



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ BETONŮ
S UHLÍKOVÝMI NANOTRUBÍČKAMI**

VERIFICATION OF THE PROPERTIES OF CONCRETE WITH CARBON NANOTUBES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

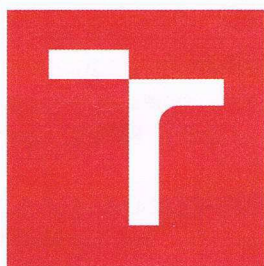
Bc. Lenka Kutová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lenka Kutová
Název	Ověřování vlastností betonů s uhlíkovými nanotrubičkami
Vedoucí práce	Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

V. Z. Drochytka



[Signature]

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Grobert N.: Carbon nanotubes becoming clean. Mater Today 2007, 10 (1–2), pp. 28–35.

Popov V.N.: Carbon nanotubes: properties and application. Mater Sci Eng R, 2004; 43.

Raki L., Beaudion J., Alizadeh R., Makar J., Sato T.: Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. Materials 2010, 3.

Yazdanbakhsh A., Grasley Z., Tyson B., Abu Al-Rub R. K.: Distribution of carbon nanofibers and nanotubes in cementitious composites. Transp Res Rec, 2010, 2142, pp. 89–95.

Abu Al-Rub R.K., Tyson B.M., Yazdanbakhsh A., Grasley Z.: Mechanical properties of nanocomposite cement incorporating surface-treated and untreated carbon nanotubes and carbon nanofibers. ASCE J Nanomech Micromech, 2012, 2(1), pp. 1–6.

Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus a další.

Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Uhlíkové nanotrubičky (CNT) při vhodné aplikaci zlepšují mechanické i trvanlivostní vlastnosti cementových kompozitů. Běžné použití uhlíkových nanotrubiček do betonu je limitováno jednak jejich poměrně vysokou cenou, ale zejména obtížností jejich dispergace v betonu.

V teoretické části diplomové práce popište vlastnosti uhlíkových nanotrubiček. Zaměřte se na informace o doporučovaném množství nanotrubiček do betonu a na způsoby aplikace nanotrubiček do betonů. Věnujte pozornost poznatkům z oblasti dispergace nanotrubiček a hodnocení kvality dispergace nanotrubiček v betonu.

V experimentální části diplomové práce připravte betony s různou dávkou uhlíkových nanotrubiček (v řádech tisícín procent z hmotnosti cementu). Popište způsob výroby betonů s uhlíkovými nanotrubičkami. Sledujte vliv různé dávky nanotrubiček na vlastnosti betonů - stanovte pevnosti betonů po 7 a 28 dnech - pevnost betonu v tlaku, pevnost betonu v tahu ohybem, pevnost betonu v příčném tahu, pevnost v tahu povrchových vrstev betonu a mrazuvzdornost betonu po 100 cyklech. Zhodnoťte dosažené výsledky, vyberte recepturu betonu s nejlepšími výsledky a definujte postup výroby betonů s uhlíkovými nanotrubičkami. Doporučený rozsah diplomové práce min. 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá sledováním vlastností betonu s dávkou uhlíkových nanočástic. V teoretické části jsou popsány vlastnosti nanočástic, jejich dávkování a dispergace. V praktické části diplomové práce byly stanoveny fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu s přídavkem uhlíkových nanotrubiček po 7 a 28 dnech zrání. Dále byla stanovena zkouška mrazuvzdornosti po 100 cyklech. Všechny výsledky byly porovnány s referenčními vzorky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Uhlíkové nanotrubičky, CNT, dispergace, dávkování, beton

ABSTRACT

This diploma thesis deals with monitoring the properties of concrete with carbon nanoparticles. The theoretical part describes properties of nanoparticles, their dosing and dispersion. In the practical part of the diploma thesis the physico-mechanical properties of the concrete with the addition of carbon nanotubes were determined after 7 and 28 days of aging. The frost resistance test was then determined after 100 cycles. All results were compared with the reference samples.

KEYWORDS

Carbon nanotube, CNT, dispersion, dosage, concrete

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Lenka Kutová *Ověřování vlastností betonů s uhlíkovými nanotrubičkami*. Brno, 2017. 85 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10.1. 2018

Bc. Lenka Kutová
autor práce

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat paní doc. Lence Bodnárové, PhD. za vedení
mojí diplomové práce, cenné rady a odborný dohled. Dále bych chtěla
poděkovat panu Ing. Tomáši Jarolímovi za pomoc s vypracováním praktické
části. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat celé rodině a příteli, kteří mi
byli duševní oporou po celé studium. VELKÉ DÍKY

Obsah

I	TEORETICKÁ ČÁST	10
1.	Úvod	10
2.	Cíl práce	12
3.	Základní charakteristiky o uhlíkových nanotrubičkách	13
3.1	Uhlík.....	13
3.2	Uhlíkové nanotrubičky.....	14
4.	Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček.....	17
4.1	Elektrická vodivost CNT	18
4.2	Pevnost a pružnost CNT	19
4.3	Tepelná vodivost a teplotní roztažnost CNT.....	19
4.4	Emisní pole CNT	20
4.5	Shrnutí základních vlastností CNT.....	21
5.	Využití CNT	22
5.1	Využití v betonu	22
5.2	Další aplikace CNT	22
6.	Dávkování CNT.....	24
7.	Dispergace CNT	26
7.1	Disperze nanočástic v cementovém a vodním prostředí.....	26
7.2	Metody dispergace.....	28
7.3	Mechanické metody dispergace CNT	29
7.4	Chemické metody dispergace CNT	29
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	31
8.	Cíl experimentu	31
9.	Použité materiály.....	32
9.1	Portlandský cement	32
9.2	Kamenivo	33
9.3	Voda.....	34
9.4	Plastifikační přísada	34
9.5	Uhlíkové nanotrubičky.....	35
9.6	Dvojsložkové lepidlo Sikadur – 31 CF Rapid	36
10.	Použitá zkušební zařízení.....	37
10.1	Magnetické míchadlo Phoenix Instrument RSM-10HS	37
10.2	Ultrazvukový homogenizátor Sonopuls HD 3200.....	38

10.3 Další použitá zařízení	40
11. Zkušební metody pro stanovení vlastností betonů	41
11.1 Zkouška sednutím	41
11.1.1 Postup zkoušky	42
11.2 Pevnost v tlaku	42
11.2.1 Výpočet	43
11.3 Pevnost v tahu ohybem	43
11.3.1 Výpočet	44
11.4 Pevnost v příčném tahu	44
11.4.1 Výpočet	45
11.5 Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu	45
11.5.1 Výpočet	46
11.6 Mrazuvzdornost betonu	46
12. Navržená receptura	48
12.1 Označení vzorků:	50
13. Příprava vzorků	51
13.1 Příprava suspenze	51
13.2 Výroba betonu	52
14. Vyhodnocení zkoušek	55
14.1 Zkouška sednutí	55
14.2 Pevnost v tlaku	55
14.3 Pevnost v tahu za ohybu	57
14.4 Pevnost v příčném tahu	58
14.5 Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu	60
14.6 Mrazuvzdornost betonu	63
13.6.1 Vyhodnocení mrazuvzdornosti betonu	63
15. Diskuse výsledků	65
16. Závěr	68
17. Technické listy použitých materiálů	69
18. Zdroje	77
19. Seznam obrázků	81
20. Seznam tabulek	83
21. Seznam grafů	84
22. Použité zkratky	85

I TEORETICKÁ ČÁST

1. Úvod

Počátek 3. tisíciletí je ve znamení nastupující éry nanomateriálů, nanotechnologií a nanostrojů. Pod pojmem nanomateriály si můžeme představit sypké materiály, nanokrystalické vrstvy nebo také nanokrystaly. Nanokrystaly jsou zrna částic o velikosti v řádu 1–100 nm, což představuje jen několik set atomů nebo molekul. Právě hranice 100 nm určuje vlastnosti nanomateriálů, především zákony kvantové mechaniky. Použití nanomateriálů je v dnešní době velmi rozsáhlé. Například nanočástice SiO_2 , které se přidávají do laků, podstatně zvyšují jejich otěruvzdornost, TiO_2 přidané do opalovacích krémů účinně absorbuje UV záření nebo teplem rozkmitané nanočástice oxidů železa vpravené do nádorových buněk mohou způsobit jejich zánik. [1]

Tato práce je zaměřená především na uhlíkové nanočástice neboli uhlíkové nanotrubičky (carbon nanotubes – CNT).

V dnešní době zažívá oblast technických oborů nevídaný růst. Moderní technologie se vyvíjejí závratným tempem a lidstvu umožňují komunikovat přes celý svět i létat do vesmíru. Dnešní vysoké životní poměry a průmysl, který se stále rozrůstá, napomáhá s vývojem technologií, které jsou mnohdy díky vysoké ceně v současné době nedostupné, ovšem jejich potenciál se jistě uplatní v budoucnu.

Uhlíkové nanomateriály představují výrazný směr moderních technologií. Uhlíkové nanotrubičky, fullereny a nejnověji také grafen, to jsou nanomateriály, které mají zajímavé mechanické, fyzikální ale také chemické vlastnosti. Využití nalézají v různých oblastech jako třeba v lékařství, elektronice, ale také ve stavebnictví. [2]

Nanotechnologie jsou již vnímány jako skupiny rozvíjejících se technologií. V současné době se skládají ze čtyř hlavních oblastí, a to nanoelektroniky, nanomateriálů, molekulární nanotechnologie a mikroskopů pracujících s rozlišením v řádu nanometrů.

Nanotechnologie je klíčovým tématem 21. století. Nanotechnologie mění a ovlivňuje směr ekonomiky ve všech oblastech průmyslu a zároveň vede k rostoucímu počtu pokrokových a materiálových inovací. Inovace se

uplatňují v mnoha odvětvích, jako je například zdravotnictví, energetika, informatika, kosmetika ale také potravinářství. Množství nanomateriálů, které je každoročně dodáváno na světový trh roste. Zájem o nanomateriály se zvyšuje zvláště díky jejich nevšedním vlastnostem, které ovšem vzbuzují jisté obavy a přinášejí řadu otázek z oblasti nanobezpečnosti. [3]

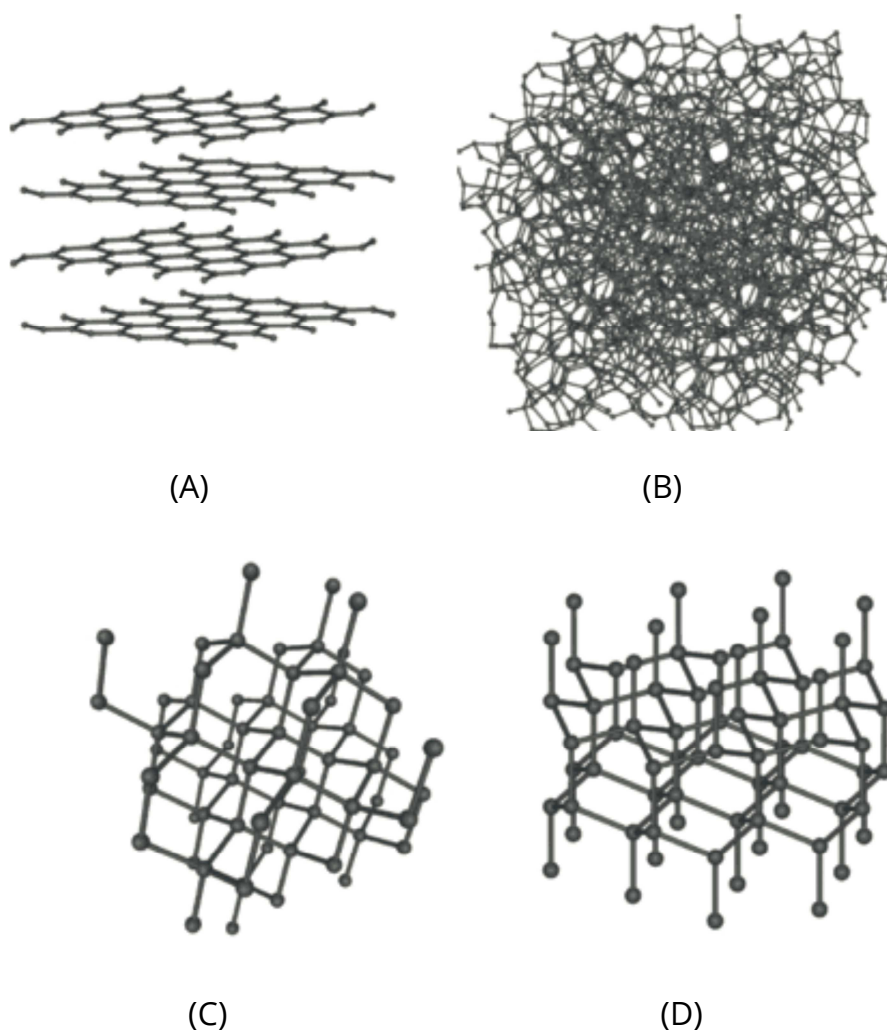
2. Cíl práce

Cílem této práce je studium vlivu použití uhlíkových nanotrubiček na vlastnosti betonů, rešerše poznatků z oblasti vlastností uhlíkových nanotrubiček (CNT), doporučeném množství CNT do betonu a metodách dispergace nanotrubiček do betonu. Cílem experimentální části práce je příprava betonů s různými dávkami uhlíkových nanotrubiček, definování vhodné technologie výroby betonů s uhlíkovými nanotrubičkami, včetně procesu dispergace a sledování vlivu různých dávek uhlíkových nanotrubiček na vlastnosti betonu. Kromě pevností betonu v tlaku, v tahu za ohybu, příčném tahu a pevností v tahu povrchových vrstev betonu je sledována také mrazuvzdornost betonu po 100 cyklech.

3. Základní charakteristiky o uhlíkových nanotrubičkách

3.1 Uhlík

Uhlík je základním prvkem, který je stavebním kamenem všech organických sloučenin. Je stabilní v několika molekulových strukturách, které nazýváme alotropy. Mezi nejznámější alotropy, které se navíc vyskytují v přírodě, patří grafit. Grafit můžeme dále nazvat také amorfním uhlíkem nebo fullerénem. Je také modifikací uhlíku s molekulovou krystalickou stavbou a je charakteristický kulovitými útvary s 60 atomy uhlíku. Mezi vzácnější alotropy uhlíku řadíme krystalický uhlík, který známe pod pojmem diamant. [4,5]



Obrázek 1: Vybrané alotropy uhlíku: A) grafit; B) amorfní uhlík; C) diamant; D) lonsdaleit [6]

V periodické tabulce prvků je na 6. pozici a je řazen mezi nekovy. [7]

		
	osmistěn	dvojploši
	Diamant	Grafit (tuha)
krystalografická soustava	kubická	šesterečná
tvrdost (dle Mohse)	10	1
hustota	3,5 g cm ⁻³	2,2 g cm ⁻³
elektrická vodivost	nevodivý	vodivý

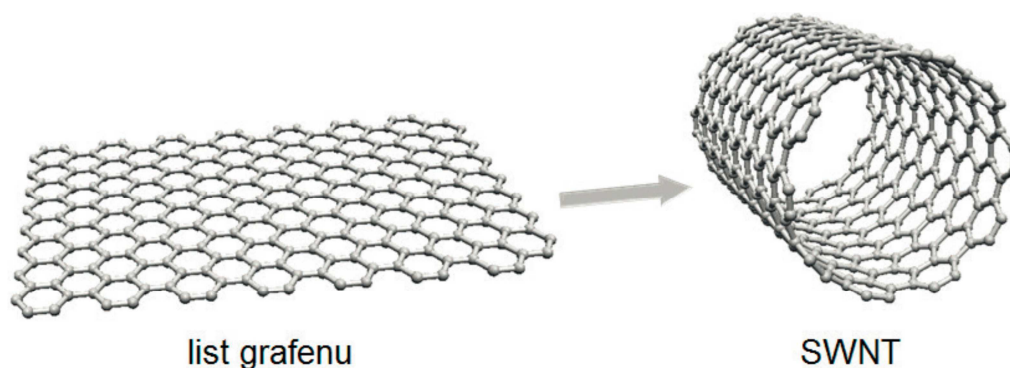
Obrázek 2: Porovnání některých vybraných vlastností diamantu a grafitu [1]

3.2 Uhlíkové nanotrubičky

Uhlíkové nanotrubičky byly objeveny v roce 1991 panem prof. Sumio Iijimou. CNT jsou zajímavé jak svými vlastnostmi, tak i následným využitím v dalších aplikacích. Jedinečným rysem těchto struktur jsou jejich elektronické, mechanické, optické a chemické vlastnosti, které otevírají cestu k budoucímu vývoji. [8]

Existují různé typy CNT, které lze vyrábět různými způsoby. Nejběžnějšími technikami v dnešní době jsou: obloukové výboje, laserová ablace, chemické vylučování a plamenná syntéza. Čištění CNT lze též rozdělit na několik hlavních technik a to: oxidace, ošetření kyselinami, žíhání, sonikace, filtrování a funkcionalizační techniky. [8]

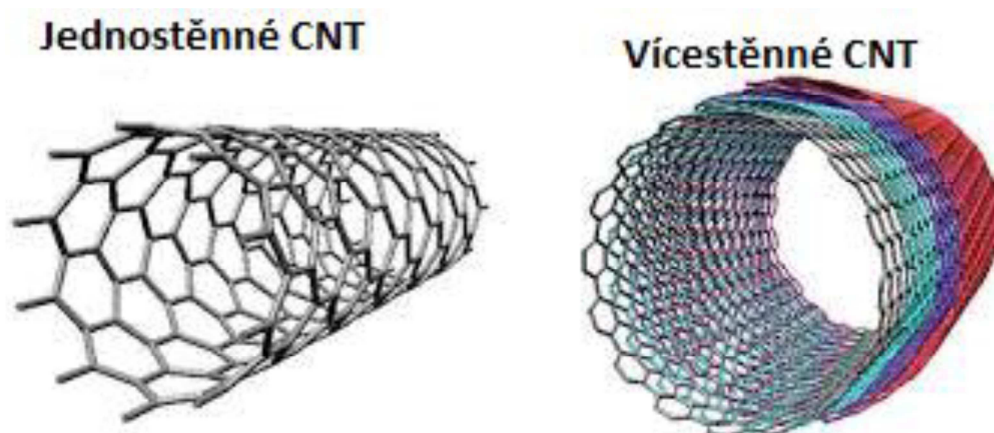
Uhlíkové nanotrubičky (CNT – carbon nanotube) jsou úžasnou alotropickou modifikací uhlíku. Je to tedy látka složená jen z atomů uhlíku. CNT jsou podlouhlé útvary o průměru 1 až 100 nanometrů a délce dosahující 100 mikrometrů. Rozlišujeme jednotěnné (SWCNT – single wall carbon nanotube) a víceštěnné (MWCNT – multi wall carbon nanotube) uhlíkové nanotrubičky. [9]



Obrázek 3: Srolování grafenu do SWCNT [6]

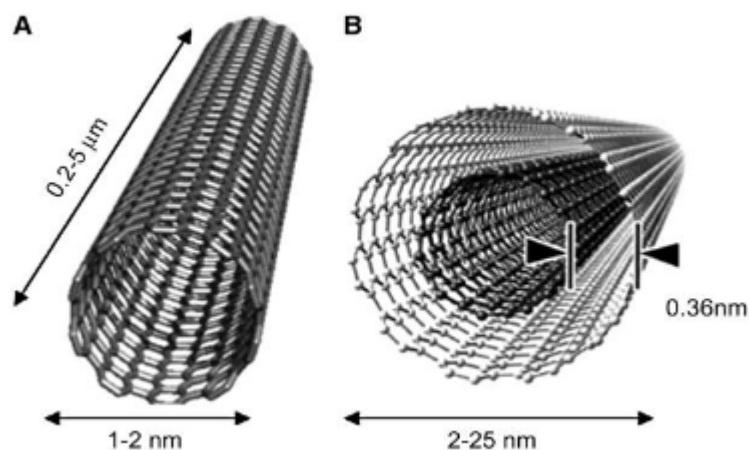
Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky mají průměr 1,2 – 1,4 nm, vícevěnné dosahují obvykle průměru 1,2 – 20 nm. Většinou mají 5 – 20 vrstev, které jsou od sebe vzdáleny asi 0,34 nm. [10,11]

Typ SWCNT vykazuje vyšší mechanické vlastnosti oproti MWCNT. Youngův modul pružnosti dosahuje 0,3 až 1 TPa a pevnost 10 až 60 GPa. [12,13]



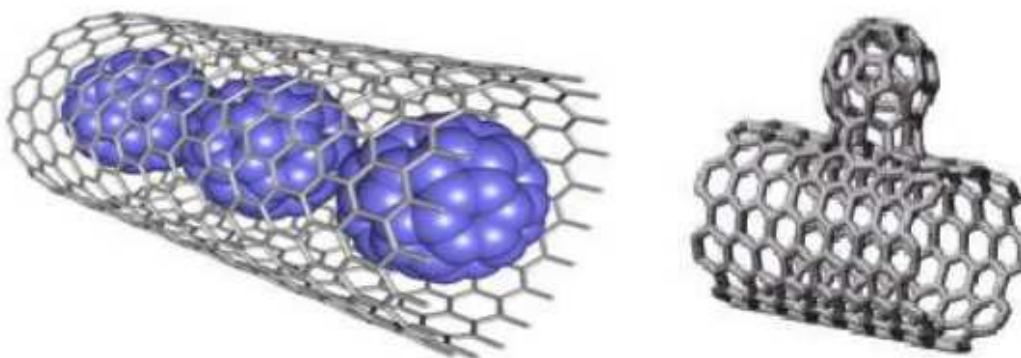
Obrázek 4: Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky vlevo a vícevěnné uhlíkové nanotrubičky vpravo [14]

Dalším typem CNT jsou dvouvrstvé nanotrubičky (DWCNT – dual walled carbon nanotube), které obsahují dvě vrstvy grafitových rovin, které jsou stočené do válce.



Obrázek 5: Jedno a dvouvrstvé nanotrubičky [13]

V neposlední řadě existují speciální nanotrubičky. Ty jsou specifické svým vzhledem. Mají válcový tvar, tvořený stočenou vrstvou grafitu, ale s různými tvary a kombinací nanotubic, nebo jsou uvnitř plněné neuhlíkovými atomy, nebo ionty. [15]

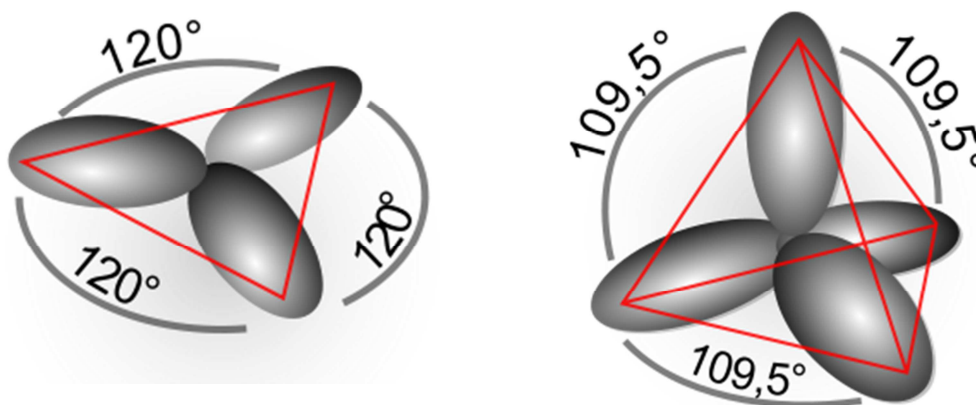


Obrázek 6: Speciální typy nanotubic [15]

4. Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček

Uhlíkové nanotrubičky jsou součástí rodiny fullerenů (molekuly složené zcela z uhlíku) a mají podobnou strukturu jako grafit. Konkrétně nanotrubičky mají válcovitou nanostrukturu s obrovským poměrem délky k průměru. Jedná se v podstatě o dlouhou, dutou strukturu s jednosložkovými tlustými stěnami. Jejich specifické vlastnosti závisí na úhlu, na který se stěny navíjejí při výrobě a na poloměru výsledné CNT. [16]

Mohli bychom se ptát, co dělá nanotrubičky tak zajímavými. V podstatě jsou to nejsilnější a nejpevnější materiály, které byly objeveny. Což znamená, že je možné je protáhnout a vytáhnout před porušením. To je většinou způsobeno povahou jejich chemické vazby (sp^2 – rovnostranný trojúhelník), která je silnější než povaha diamantů (sp^3 - tetraedr), viz obrázek 7. Mají schopnost také odolávat velkému tlaku. Mají měnící se elektrické vlastnosti. Vykazují optickou absorpci a dobrou tepelnou vodivost. Nevýhodou těchto materiálů je jejich toxicita. [16]



Obrázek 7: Vlevo tři sp^2 orbitaly, vpravo čtyři sp^3 orbitaly [17]

Ve vztahu k elektrickému proudu se CNT chovají jako vodiče nebo polovodiče v závislosti na jejich struktuře. Ideální využití CNT je v elektronice a nanoelektronice. Díky mechanickým vlastnostem CNT jsou vhodné jako plnivo do polymerní matrice. Mají vysokou mechanickou pevnost a tepelnou vodivost. [18]

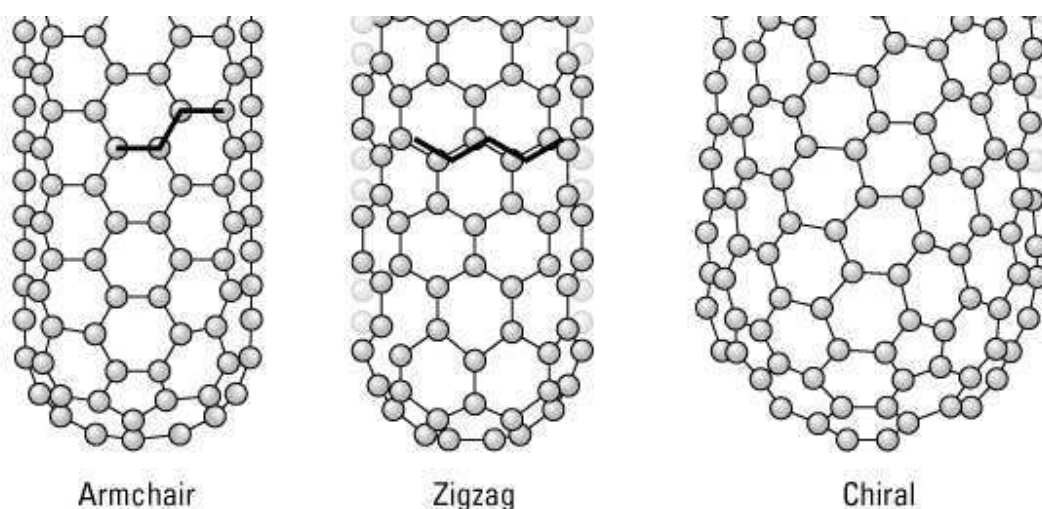
Elektronické, molekulární a strukturní vlastnosti uhlíkových nanotrubiček jsou do značné míry určeny jejich téměř jednosměrnou strukturou. Výběr nejdůležitějších vlastností CNT je uveden níže. [8]

- CNT mají vysokou elektrickou vodivost,
- vysokou pevnost v tahu,
- jsou velice flexibilní – mohou být značně ohnuty bez poškození,
- jsou velmi elastické – lze je protáhnout až o 18 %,
- mají vysokou tepelnou vodivost,
- a nízkou tepelnou roztažnost. [19]

4.1 Elektrická vodivost CNT

Značný zájem při sledování vlastností CNT byl věnován jejich vodivosti. CNT lze považovat za vysoce vodivý materiál. Vodivost CNT byla prokázána jako funkce jejich chirality (stupeň zakroucení), stejně jako jejich průměr. CNT mohou být buď kovové, nebo polovodičové v závislosti na jejich elektrickém chování. [19]

Vodivost v MWCNT je poměrně složitá. Některé typy CNT typu „armchair“ se zdají být lepší než jiné kovové CNT. Kromě toho bylo zjištěno, že mezibuněčné reakce uvnitř MWCNT nerovnoměrně přerozdělují proud na jednotlivé trubky. [19]



Obrázek 8: Elektrické vlastnosti závisící na orientaci šestiúhelníků [20]

Vodivost a měrný odpor SWCNT byl měřen pomocí elektrod umístěných v různých částech CNT. Měrný odpor SWCNT byl v řádu 10^{-4} ohm-cm při teplotě 27 °C. To znamená, že SWCNT jsou nejvíce vodivá uhlíková vlákna, která známe. Hustota proudu, které bylo možné při tomto experimentu dosáhnout, byla $107 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, teoreticky by ale vlákna CNT měla být schopna udržet vyšší stabilitu proudové hustoty, a to až do $1013 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$. [19]

4.2 Pevnost a pružnost CNT

Atomové uhlíky jedné vrstvy grafitu tvoří rovinnou mřížkovou strukturu, ve které je každý atom spojen silnou chemickou vazbou se třemi sousedícími atomy. Kvůli těmto silným vazbám je základní elastický model grafitu jeden z největších jakýchkoliv známých materiálů. Z tohoto důvodu se očekává, že CNT budou vlákna s vysokou pevností. SWCNT jsou tužší než ocel a jsou velmi odolné vůči poškození fyzikálními silami. Stisknutí špičky nanotrubičky způsobí ohnutí, ale bez poškození špičky. Po odstranění síly se špička vrátí do původního stavu. [19]

Kvantifikace těchto efektů byla poměrně obtížná a přesná číselná hodnota nebyla pevně stanovena. Pomocí ultrazvuku atomové síly (AFM) mohou být nekonečné konce volně stojící nanotrubice vytlačeny ze své rovnovážné polohy a síla potřebná k vytlačování nanotrubice může být měřena. Současná hodnota Youngova modulu SWCNT je asi 1 TPa. Byly zaznamenány i významně vyšší hodnoty jako třeba 1,8 TPa. Rozdíly pravděpodobně vznikají různými experimentálními měřicími technikami. Při práci s MWCNT vědci poznamenali, že měření modulu pomocí AFM technik nezávisí na průměru nanotrubice. Namísto toho argumentují, že modul MWCNT koreluje s množstvím poruch ve stěnách nanotubic. Proto také nemůže být překvapením, že pokud dojde k porušení MWCNT, rozpadají se nejprve v té nejvzdálenější vrstvě. [19]

4.3 Tepelná vodivost a teplotní roztažnost CNT

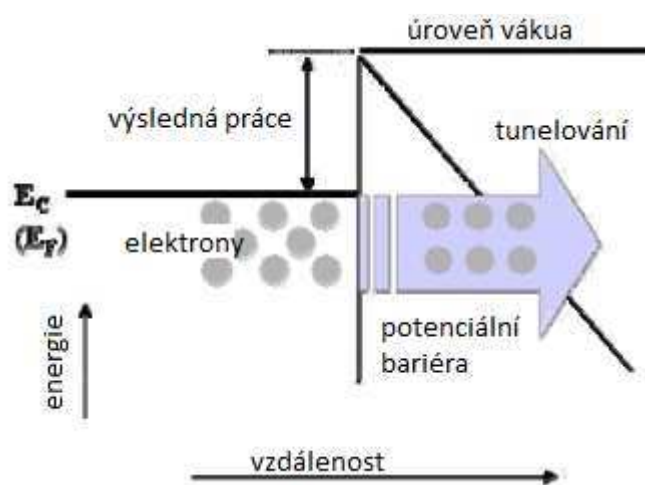
Výzkum provedený na univerzitě v Pensylvánii ukázal, že CNT jsou velmi dobrým materiálem pro vedení tepla. Malé SWCNT dokonce vykazovaly supravodivost pod 20 °K.

Silné grafitické vazby C-C (uhlík – uhlík) způsobují, že jsou extrémně silné a tuhé oproti axiálnímu namáhání. Téměř nulová teplotní roztažnost v rovině, ale velká roztažnost SWCNT mezi rovinami, znamená silnou

spojnici v rovině a vysokou pružnost proti neaxiálním kmitům. Bylo navrženo mnoho aplikací CNT, jako jsou molekulová elektronika, snímací a ovládací zařízení nebo jako přídatná výztužná vlákna ve funkčních kompozitních materiálech. [19]

4.4 Emisní pole CNT

Emisní pole je výsledkem tunelování elektronů z kovového hrotu do vakua pod silným elektrickým polem. Malý průměr a vysoký poměr stran CNT jsou pro emisní pole velmi přitažlivé. Dokonce i při mírném napětí se vyvinulo silné elektrické pole na volném konci podporovaných CNT kvůli jejich ostrosti. To bylo pozorováno de Heerem a jeho spolupracovníky v EPFL (švýcarský federální technologický institut v Lausanne) v roce 1995. Studium emisních vlastností MWCNT pozoroval Bonard a spolupracovníci v EPFL, kdy zjistili, že elektrony vydávají světlo. Tato luminiscence je indukována emisí elektronového pole, protože není detekována bez aplikovaného potenciálu. Toto vyzařování světla se objevuje ve viditelné části spektra a někdy může být dokonce pozorováno pouhým okem. [19]



Obrázek 9: Schématické znázornění emise elektronů v silném elektrickém poli [21]

4.5 Shrnutí základních vlastností CNT

Tabulka 1: Všeobecné shrnutí vlastností CNT [22]

Elektrické	<ul style="list-style-type: none">• balistická vodivost• vysoká proudová hustota a proudová zatížitelnost• polovodičový a kovový charakter
Mechanické	<ul style="list-style-type: none">• vysoký Youngův modul• pružnost a flexibilita• vysoká stabilita a velká tepelná zatížitelnost
Chemické	<ul style="list-style-type: none">• velká absorpční kapacita• absorpce plynů a kapalin
Optické	<ul style="list-style-type: none">• vynikající emisní vlastnosti• nízká výstupní práce elektronů
Magnetické	<ul style="list-style-type: none">• diamagnetické• závislost E_g od magnetického pole

5. Využití CNT

5.1 Využití v betonu

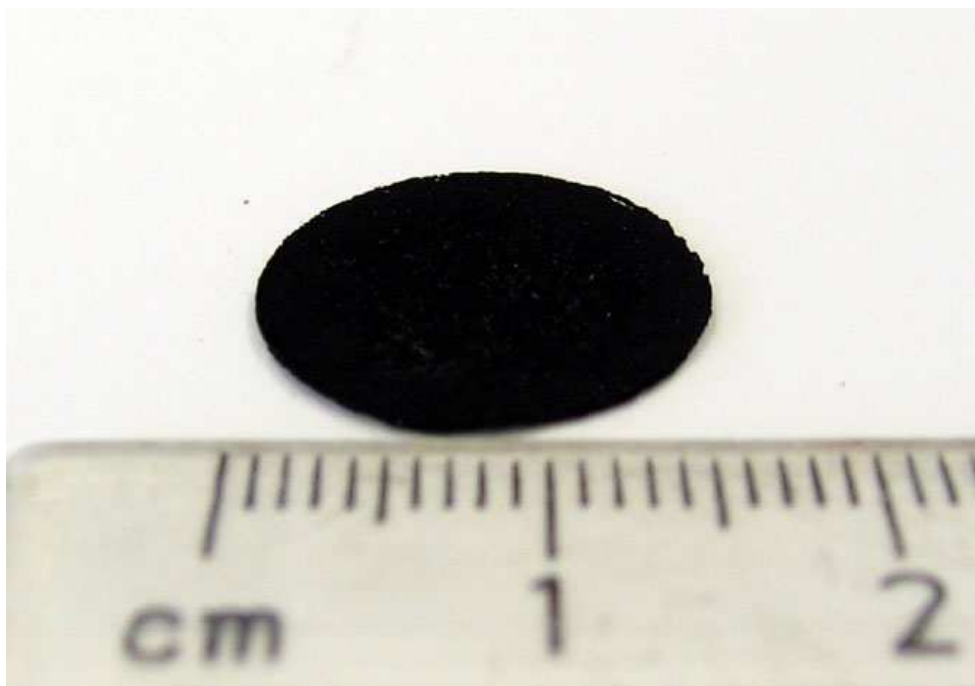
Pokročilé technologické aspekty materiálů na bázi cementu se nedávno zaměřily na vývoj vysoce hodnotných cementových kompozitů, které vykazují vysokou pevnost v tlaku. Takové kompozity ale vykazují také velmi křehký lom, nízkou pevnost v tahu. Výsledkem jsou kompozity citlivé na mikrotrhliny v raném stádiu objemových změn v důsledku vysokých autogenních stresových napětí. Tyto vlastnosti materiálů na bázi cementu jsou vážnými nedostatky, které omezují konstrukční návrh a ovlivňují dlouhodobou trvanlivost konstrukcí. Cementové matrice vykazují nedostatek v nanočásticích, kde tradiční výztuž není tolik efektivní. CNT představují několik zřetelných výhod při použití do betonu ve srovnání s tradičními vlákny. Za prvé, vykazují výrazně vyšší pevnost a tuhost, než konvekční vlákna, která by měla zlepšit celkové mechanické chování. Za druhé se očekává, že jejich vysoký štíhlostní poměr účinně zastaví šíření mikrotrhlinek, které vyžadují výrazně vyšší energii. A za třetí, pokud jsou CNT jednotně rozptýleny, je vzhledem k jejich průměru snížena rozteč mezi vlákny. [23]

5.2 Další aplikace CNT

CNT mají pozoruhodné vlastnosti a vlastnosti jako konstrukční materiály. Jejich potenciální aplikace zahrnují také:

- textilie – CNT mohou být používány při výrobě tkanin, které jsou vodotěsné a odolné proti roztržení
- pancéře – CNT vlákna se používají také při výrobě bojových bund, které uživatele chrání před kulkami
- beton – CNT v betonu zvyšují pevnost v tahu a zastavují šíření trhlinek
- polyetylen – polyetylen na bázi CNT může zvýšit modul pružnosti polymerů o 30 %
- sportovní vybavení – golfové míče, golfové hole, silnější a lehčí tenisové rakety, části jízdních kol a baseballové pálky

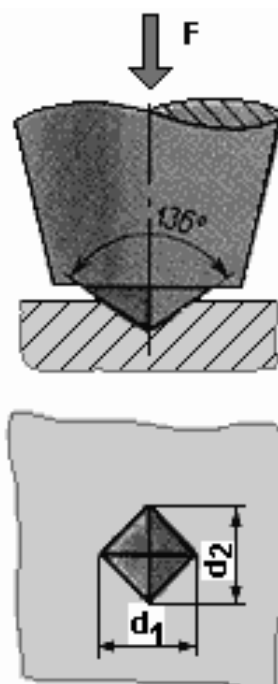
- protipožární ochrana – tenké vrstvy CNT mohou potenciálně chránit předmět proti ohni, hustá kompaktní vrstva CNT ve formě „buckypaper“ může efektivně odrážet teplo [23]



Obrázek 10: Buckypaper vyrobený z uhlíkových nanotrubiček [24]

6. Dávkování CNT

Bylo provedeno několik pokusů s přidáním CNT jako výztuže do cementové matrice. Makar a kolektiv zkoumali účinek posílení přidáním 2,0 % hmotnosti CNT z množství cementu. S použitím metod SEM (skenovací elektronový mikroskop) a Vickersovy tvrdosti (do materiálu se vtlačuje pod zatížením F diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o daném vrcholovém úhlu mezi protilehlými stěnami po danou dobu, následně se změří střední délka u obou úhlopříček vtisku). Získané výsledky naznačily, že CNT ovlivňují časný hydratační průběh a vytváří vyšší hydratační produkty. [23]



Obrázek 11: Zkouška tvrdosti podle Vickerse [25]

Li a kolektiv, používali postup zlepšení karboxylace použitím 0,5 % MWCNT hmotnosti cementu a získali 25% nárůst pevnosti tahu ohybem a 19% nárůst pevnosti v tlaku. Saez de Ibarra a kolektiv měřili tuhost cementových vzorků vyztužených MWCNT a SWCNT s použitím AFM nanoidentace a vykazují mírný nárůst v Youngově modulu. [14] V poslední době Cwirzen a kolektiv zkoumali mechanické vlastnosti vyztužených cementových matric s různými koncentracemi MWCNT. Výsledky nevykazovaly zvýšení pevnosti v ohybu, ale vykazovaly mírné zvýšení pevnosti v tlaku cementové pasty s přídavkem CNT. [23]

Byl studován vývoj vysoce výkonných cementových nanokompozitů vyztužených MWCNT. V rámci studie bylo zjištěno, že malé množství účinně dispergovaných MWCNT v dávce 0,025 až 0,08 % z hmotnosti cementu, může výrazně zvýšit pevnost a tuhost cementové matrice. Nižší množství dlouhých MWCNT (0,025 – 0,048 % hmotnostních) poskytuje účinnou výztuž, zatímco při použití krátkých MWCNT je potřeba pro dosažení stejné úrovně vyztužení vyšší množství (blízké 0,08 % hm.). Bylo také zjištěno, že účinně dispergované MWCNT poskytují unikátní roli v materiálech na bázi cementu. [23]

Výsledkem nanoindentace je, že MWCNT mohou silně modifikovat a posilovat nanostrukturu cementové matrice. Ve srovnání s obyčejným betonem se zdá, že nanokompozity mají vyšší obsah C-S-H fází a sníženou nanoporozitu. Vzhledem k jejich malým průměrům (20 – 40 nm), MWCNT výrazně snižují množství jemných pórů. Tento jev vede ke snížení kapilárního napětí, což má příznivý účinek na předčasnou deformační kapacitu nanokompozitů. [23]

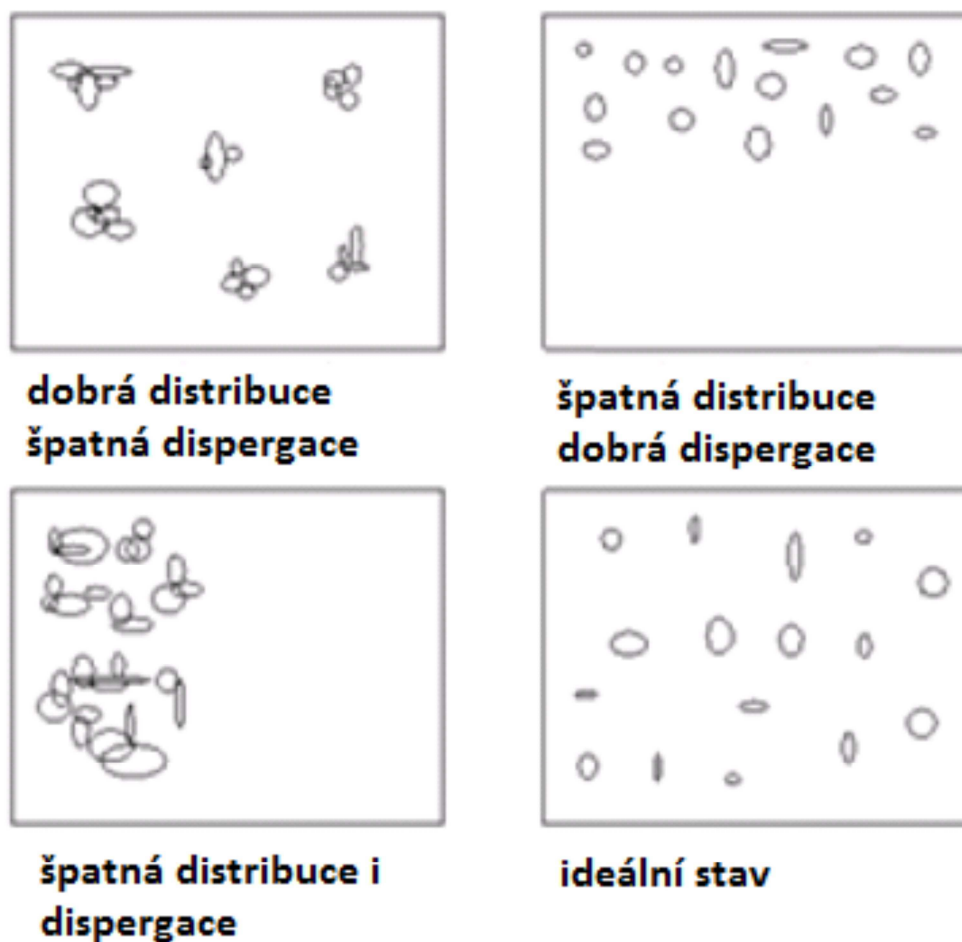
7. Dispergace CNT

Použití různých typů nanočástic, záruk moderní technologie, se stalo průmyslovější a běžnější od svého prvního vystoupení v posledních desetiletích. Jak je známo, nanočástice mají široké uplatnění při úpravách různých aspektů betonových a cementových směsí, například mechanických vlastností, pórovitosti a odolnosti proti mrazu. S těmito výhodami, které jsou známy, nastává problém týkající se nanomodifikace, a to konkrétně disperzní účinnosti. Komerční nanočástice, přestože jsou vyráběny a dodávány ve velikostech pod 100 nm, se obvykle zobrazují jako velké aglomeráty o rozměrech od 1 do 100 μm . Aglomerace snižuje specifický povrch nanočástic, čímž brání plnému využití těchto vzácných materiálů s cílem zlepšit požadované vlastnosti betonu a dalších cementových směsí. Navíc tvorba a přítomnost těchto aglomerátů brání správnému rozptýlení nanočástic uvnitř matrice, což vede k vytvoření oslabených zón v matici konečného produktu. Ideální disperze může být popsána jako stav, ve kterém jsou nanočástice zcela oddělené od sebe a žádné shluky, nebo aglomeráty v nich nenajdeme. [26]

7.1 Disperze nanočástic v cementovém a vodním prostředí

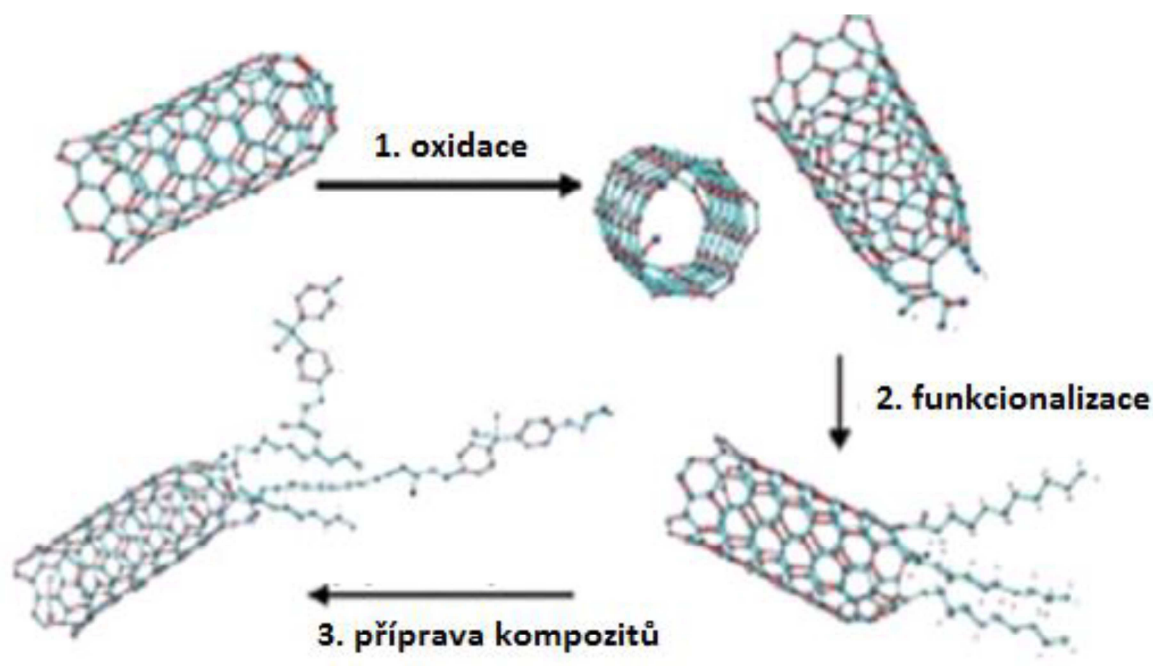
Mnoho z experimentů na disperzi nanočástic bylo provedeno ve vodním prostředí spíše než v cementové matici. [26]

Cementové prostředí, a to buď z pasty, nebo malty je vyplněno více ionty. Včetně sodíku, draslíku, vápníku, síry a hydroxylových iontů, které jsou hlavními složkami, s hliníkem a křemíkem v nižších koncentracích. Výše uvedené ionty udržují konstantní koncentraci, která má tendenci během hydratace cementu kolísat. Během prvních hodin po výrobě disperze, například koncentrace vápníku a síranu, zůstávají hydroxylové ionty téměř stabilní. Oproti tomu koncentrace iontů vápníku a síranů výrazně klesá v rozsahu 6 až 24 hodin po zahájení hydratačního procesu. Jak iontové složení pórů kapaliny cementových kompozitů a tendence iontové adsorpce nanočástic oxidu křemičitého ve vodních médiích ovlivňují stabilitu částic oxidu křemičitého, což způsobuje významnou aglomeraci těchto materiálů. [26]



Obrázek 12: Schopnost deaglomerace CNT do matrice [14]

Kromě zmíněných faktorů je účinek pH také velmi důležitý pro správnou disperzi. Mendosa a kolektiv studovali účinek zvýšení pH na OH-funkcionalizované vícevrstvé uhlíkové nanotrubičky pomocí prášku z $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Bylo zjištěno, že se zvýšenou hodnotou pH klesá zeta potenciál. Tento efekt by mohl být přičítán interakci mezi MWCNT a $\text{Ca}(\text{OH})_2$, což nakonec ovlivnilo stabilitu disperze a způsobilo re-aglomeraci. Navíc tento jev bránil elektrostatickým odpuzujícím interakcím mezi negativními funkčními skupinami MWCNT a molekulami superplastifikátoru, které převádějí Van der Waalsovy síly. [26]



Obrázek 13: Schéma funkcionalizace uhlíkových nanotrubiček [14]

7.2 Metody dispergace

Prvním krokem správné disperze nanočástic by mělo být využití dostatečného množství energie k rozpadu agregátů a aglomerátů do menších velikostí. Po rozbití aglomerátů je dalším krokem stabilizace fragmentů a zabránění jejich re-aglomeraci pomocí správných mechanismů, jako je sterická a elektrostatická odpuzivost. Je snaha získat nejlepší stav disperze, s použitím kombinace mechanických metod a chemických modifikací. [26]

Mechanické metody včetně míchání s vysokým stříhem, mechanické míchání, dispergace ultrazvukem nebo mletí v kulovém mlýnu, jsou používány k usnadnění disperze nanočástic pomocí vodních roztoků a kompozitních směsí. Společně s fyzikální povrchovou úpravou s využitím organických přísad a různých druhů povrchově aktivních látek, vedle chemické povrchové úpravy, byla rovněž použita disperze nanočástic pomocí funkcionalizace. [26]

Použití vhodných organických přísad přináší výhodu stabilizace pomocí sterické překážky a elektrostatického odpuzování, pokud má přísada alespoň iontovou funkční skupinu. Fyzická úprava povrchu je obvykle prováděna pomocí povrchově aktivních látek, také známých jako povrchově

aktivní činidla na bázi různých typů superplastifikátorů a jiných druhů dispergátorů. Povrchově aktivní látky se obvykle skládají z hydrofilní skupiny a uhlovodíkového řetězce (hydrofobní skupina), která je rozvětvená, lineární nebo aromatičká. Podle polaritý hlavových skupin jakou povrchově aktivní látky buď iontové nebo neiontové. Iontově povrchově aktivní látky obsahují nejméně jeden typ ionizovaných funkčních skupin, jako je karboxylová skupina a skupina sulfonových kyselin, které kromě sterického účinku vytvářejí elektrostatické odpuzování. Tato kombinace účinků proti Van der Waalsovým silám je označována jako elektrosterická odpudivost. Nejvíce běžné povrchově aktivní látky používané v průmyslu jsou superplastifikátory, které jsou aplikovány do vysoce pevnostních betonů, kde jsou nepostradatelné. [26]

Funkcionalizace je tedy proces připojování funkčních skupin na povrchu hydrofobních nanočástic za účelem zlepšit hydrofilní chování těchto materiálů. [26]

7.3 Mechanické metody dispergace CNT

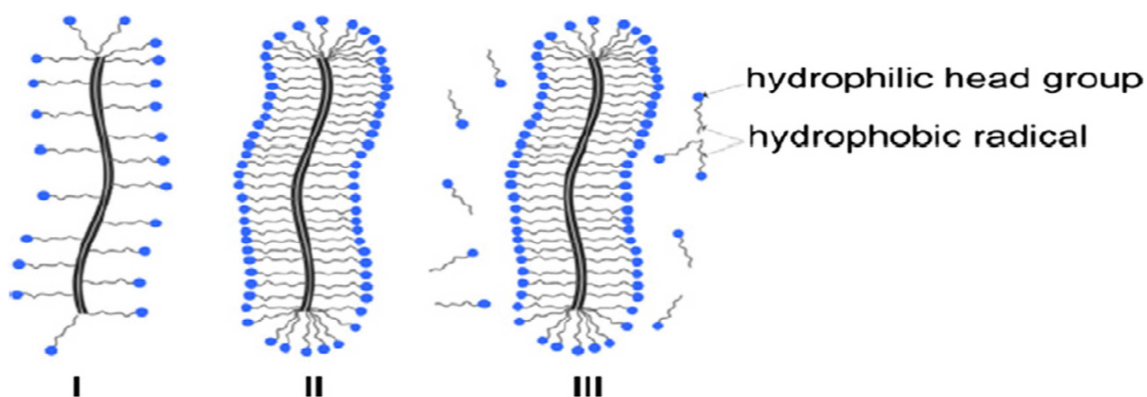
Ultrazvuk je nejběžnější fyzikální technikou pro dispergaci CNT do matrice. V dalších studiích se uvádí i magnetické míchání nebo ruční míchání. Přestože vyššího stupně dispergace lze dosáhnout zvýšením energie, ultrazvuk může poškodit strukturu částic, indukující vady, jako je dislokace, vznik amorfního uhlíku na CNT, snížení poměru jejich stran a přerušení soudržnosti mezi trubkami a maticí. Proto optimální energie ultrazvuku, která vyrovnává požadovanou disperzi s minimálním indukovaným poškozením, byla navržena, v závislosti na koncentraci CNT, průměru, délce a rozpouštěcího média. Islam a kolektiv doporučil sonikaci s nízkým výkonem v lázni k zachování délky a struktury CNT. Sabolkina a kolektiv dospěli k závěru, že na základě zkoušek UV-Vis spektra by sonikace měla trvat déle než 30 minut, aby bylo dosaženo uspokojivého rozptýlení. [26]

7.4 Chemické metody dispergace CNT

Funkcionalizace je chemické ošetření, které se provádí prostředky čistých kyselin jako je H_2SO_4 a HNO_3 , kdy výsledkem je kovalentní vazba mezi hydroxylovými nebo karboxylovými skupinami s povrchem CNT v důsledku oxidace. Za zmínku stojí, že ve většině takových studií byly karboxylové funkční skupiny vybrané pro funkcionalizace CNT. Kromě vysoké produkce,

kapacita této metody, chemické vazby mezi -COOH skupin nanotrubic a fáze C-S-H cementu, může dojít ke zlepšení přenosu zatížení. [26]

Na rozdíl od funkcionalizace, povrchově aktivní látka neovlivňuje elektrické a mechanické vlastnosti CNT. Ale její hodnota má silný vliv na konečné mechanické vlastnosti cementových kompozitů. Jak je vidět na obrázku 14, který je založený na teorii tvorby micel. Je možné dosáhnout tří stavů. Možné stavy dosáhneme zvýšením koncentrace surfaktantu. Před dosažením kritické koncentrace povrchově aktivní látky, nejsou schopny pokrýt povrch CNT úplně, tedy Van der Waalsovy síly dominují a dochází k aglomeraci. Pokud je kritická koncentrace surfaktantu dosažena, může se zcela pokrýt povrch CNT, který tvoří tyčovitě micely a blokují interakci mezi CNT pomocí jejich vzájemného elektrostatického odpuzování nebo sterické přepážky. Další zvýšená dávka povrchově aktivního činidla nad kritickým množstvím vede ke vzniku vícevrstvé molekuly povrchově aktivních látek, které nemohou zlepšit disperzi částic. [26]



Obrázek 14: Schematické znázornění povrchového stavu CNT zvýšením koncentrace surfaktantu I) nízký koncentrace surfaktantu, II) tvorba tyčinkovitých micel, III) tvorba vícevrstvých molekul povrchově aktivních látek [26]

II PRAKTICKÁ ČÁST

8. Cíl experimentu

Cílem této práce je připravit beton s různými dávkami uhlíkových nanotrubiček pro stanovení optimálního množství, které nejvíce zlepšuje vlastnosti betonu. Z rešerší a na základě předchozích experimentů [14] lze stanovit optimální množství uhlíkových nanotrubiček do cementových kompozitů v dávkách tisícín až setin procenta. Pro experimenty provedené v diplomové práci byla dávka stanovena na 0,0015, 0,006 a 0,012 % z hmotnosti cementu.

V experimentální části diplomové práce byla dále definována vhodná technologie výroby betonů s uhlíkovými nanotrubičkami a sledování vlivu různých dávek CNT na vlastnosti betonu.

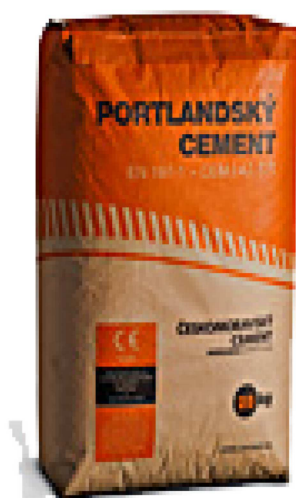
Na betonových zkušebních tělesech byly provedeny zkoušky fyzikálně-mechanických vlastností a stanovení mrazuvzdornost betonu po 100 cyklech.

9. Použité materiály

K přípravě zkušebních těles byly použity níže popsané materiály.

9.1 Portlandský cement

Při výrobě betonu byla použita jako pojivá složka Portlandský cement CEM I 42,5 R dodaný od společnosti Českomoravský cement a.s., výrobní závod Mokrý. Tento druh cementu se vyznačuje rychlým nárůstem pevností, vysokou počáteční pevností a rychlým vývinem hydratačního tepla. Je dodáván balený v papírových pytlích po 25 kg. Další vlastnosti jsou shrnuty v tabulce 2. Více informací je uvedeno v technickém listu v kapitole 17.



Obrázek 15: Balený portlandský cement CEM I 42,5 R [27]

Tabulka 2: Vybrané vlastnosti uváděné výrobcem portlandského cementu CEMI 42,5 R, Českomoravský cement, a.s., výrobní závod Mokrý.

Fyzikální vlastnosti		Složení slínku	
Počátek tuhnutí	196 [min]	MgO	1,4 [%]
Konec tuhnutí	267 [min]	C ₃ S	67 [%]
Měrný povrch	377 [m ² ·kg ⁻¹]	C ₂ S	11 [%]
Střední zrno	20 [μm]	C ₃ A	7 [%]
Měrná hmotnost	3110 [kg·m ⁻³]	C ₄ AF	11 [%]
Hydratační teplo 7 dní	300 [J·g ⁻¹]		

Chemické složení			
CaO	65 [%]	SO ₃	3,0 [%]
SiO ₂	19 [%]	S ^{II-}	0,04 [%]
Al ₂ O ₃	4 [%]	Cl ⁻	0,051 [%]
Fe ₂ O ₃	3 [%]	K ₂ O	0,75 [%]
MgO	1 [%]	Na ₂ O	0,15 [%]

9.2 Kamenivo

Pro výrobu betonu bylo jako plnivo využito kamenivo s třemi různými frakcemi:

Tabulka 3: Použitá kameniva pro výrobu betonu

Frakce [mm]	Lokalita	Druh	Výrobce
0 – 4	Žabčice	Drobné těžené kamenivo kopané (DTK)	Písek Žabčice spol. s r.o.
4 – 8	Olbramovice	Hrubé drcené kamenivo (HDK)	Českomoravský štěrk, a.s.
8 – 16	Olbramovice	Hrubé drcené kamenivo (HDK)	Českomoravský štěrk, a.s.



Obrázek 16: Ukázka použitých kameniv pro výrobu betonu [28]

Kamenivo Žabčice je písek o frakci 0 – 4 mm. Kamenivo z lomu Olbramovice je z biotického granodioritu a bylo použito ve frakcích 4 – 8 a 8 – 16 mm.

9.3 Voda

Dispergace uhlíkových nanotrubiček probíhala v demineralizované vodě. Tato voda je pomocí filtrace zbavena všech minerálů obsažených ve vodě.

Při samotné výrobě betonu byla jako záměsová voda využita pitná voda, která dle ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu vyhovuje potřebě provádění zkoušek.

9.4 Plastifikační přísada

Pro zlepšení konzistence betonu a stabilizaci rozmíchaných nanotrubiček při dispergaci byla použita superplastifikační přísada COATEX ETHACRYL HF S.C. 40%. Tato přísada je na bázi polykarboxylát etheru. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4. Dále při výrobě betonu byla přidávána superplastifikační přísada Sika ViscoCrete 4035. Vybrané vlastnosti této superplastifikační přísady najdeme v tabulce 5. Více informací je uvedeno v technickém listu v kapitole 17.

Tabulka 4: Vybrané vlastnosti superplastifikační přísady Coatex Ethacryl

Vlastnost	Hodnota
Typ chemického základu	Polykarboxylát éter
Obsah sušiny	40%
pH (20 °C)	4
Měrná hmotnost (20 °C)	1070 kg·m ⁻³
Viskozita	350 mPa·s
Obsah chloridů	< 0,01 %
Obsah alkálií (Na ₂ O _{eq})	< 1,5 %
Redukce vody	30 %

Tabulka 5: Vybrané vlastnosti superplastifikační přísady Sika ViscoCrete 4035

Vlastnost	Hodnota
Chemická báze	Vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů
pH (20 °C)	4,5
Objemová hmotnost (20 °C)	1060 kg·m ⁻³
Obsah chloridů	< 0,1 %
Obsah alkálií (Na ₂ O _{eq})	< 1,0 %

9.5 Uhlíkové nanotrubičky

Byly použity uhlíkové nanotrubičky vyrobené firmou YURUI (SHANGHAI) CHEMICAL CO., LTD. Tyto trubičky byly vyrobeny metodou chemické depozice z plynné fáze (CVD) s čistotou 95 %. Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček jsou shrnuty v tabulce 6. Více informací je uvedeno v technickém listu v kapitole 17.



Obrázek 17: Připravené uhlíkové nanotrubičky TNM7 s naváženou povrchově aktivní látkou Ethacryl v injekční stříkačce

Tabulka 6: Vybrané vlastnosti uhlíkových nanotrubiček TNM7

Vlastnost	Hodnota
Název	TNM7
Barva	Černá
Druh	MWCNT
Délka	10 – 20 μm
Vnitřní průměr	5 – 12 nm
Vnější průměr	30 – 50 nm
Objemová hmotnost	0,22 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Měrná hmotnost	2,1 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Specifický povrch	> 60 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$
Měrná elektrická vodivost	100 $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$

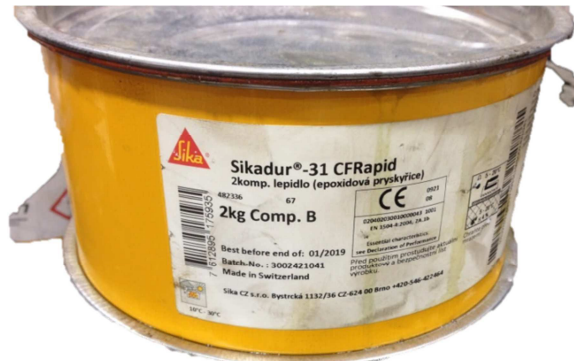
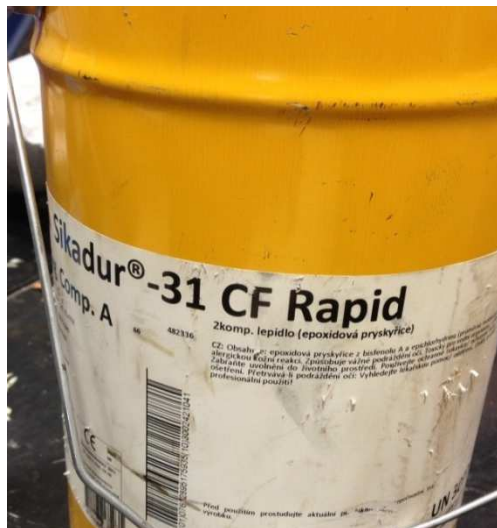
9.6 Dvojsložkové lepidlo Sikadur – 31 CF Rapid

Sikadur – 31 CF Rapid je tixotropní dvoj komponentní konstrukční lepidlo a opravná malta na bázi epoxidové pryskyřice a speciálních plniv, bez rozpouštědel. Toto konstrukční lepidlo bylo použito pro nalepení zkušebních terčů při stanovení pevnosti povrchových vrstev betonu.

Výhodou tohoto lepidla je jednoduché míchání a aplikace, je vhodné pro suchý i vlhký povrch. Má výbornou přídržnost k většině stavebních materiálů, je tixotropní – nestéká při aplikacích na vertikálních plochách nebo nad hlavou. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 7. Více informací je uvedeno v technickém listu v kapitole 17.

Tabulka 7: Vybrané vlastnosti lepidla Sikadur – 31 CF Rapid

Vlastnost	Hodnota
Chemická báze	Epoxidová pryskyřice
Objemová hmotnost	1,94 kg·l ⁻¹
Tloušťka vrstvy	Max 30 mm
Modul pružnosti v tlaku	6000 MPa
Průtažnost	0,5 %



Obrázek 18: Dvojsložkové lepidlo Sikadur 31 CF Rapid

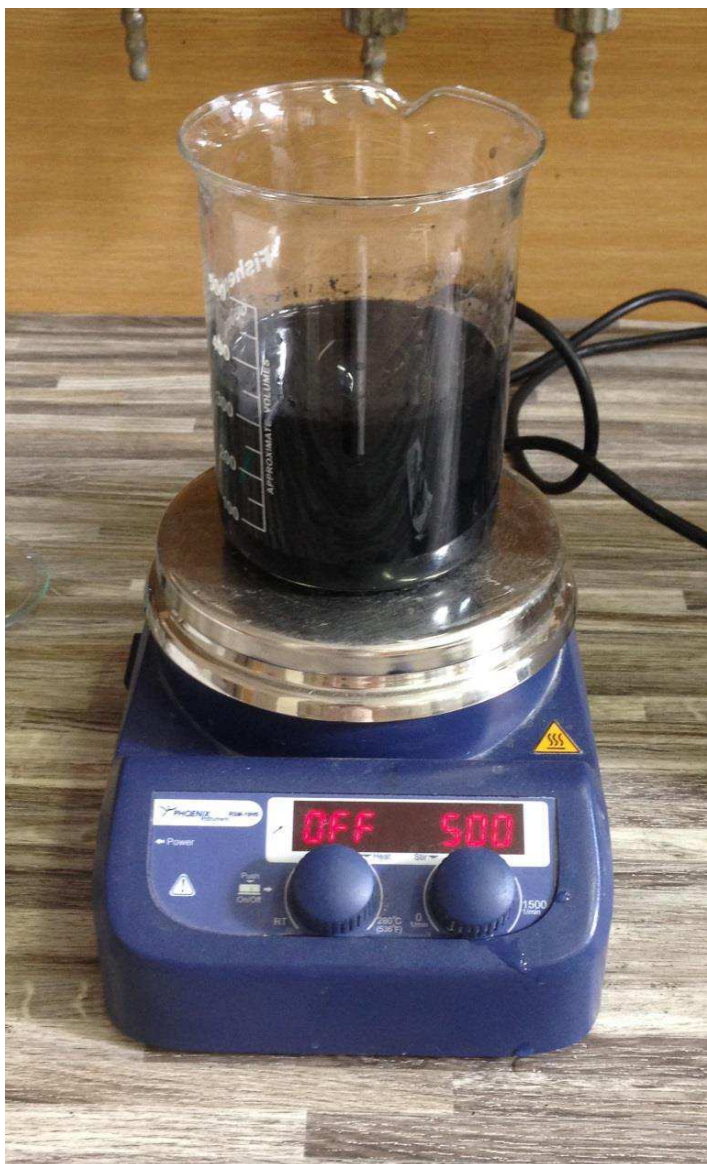
10. Použitá zkušební zařízení

V této kapitole budou uvedena všechna použitá laboratorní zařízení včetně stručného popisu, funkce a metody, kterou umožňují.

10.1 Magnetické míchadlo Phoenix Instrument RSM-10HS

Magnetické míchadlo je laboratorní přístroj, který slouží k homogenizaci. Homogenizace je prováděna pomocí rotující magnetické tyčinky, která je umístěna v nádobě s kapalinou. Rotační magnetické pole, které tyčinkou otáčí, je tvořeno z rotujícího permanentního magnetu, nebo z několika stabilních elektromagnetů. Tyto magnety jsou umístěny pod kovovou deskou, na kterou se pokládá samotná nádoba. Kovová deska může být též vyhřívaná. [29]

Míchadlo značky Phoenix, které slouží k homogenizaci směsi vody, nanočástic a superplastifikační přísady, dokáže míchat až při 100 – 1500 otáčkách za minutu. Vyhřívání kovové desky má tepelný výkon 500 W, kdy zahřívaná suspenze dokáže být udržována až na 280 °C.



Obrázek 19: Magnetické míchadlo Phoenix Instrument RSM-10HS

10.2 Ultrazvukový homogenizátor Sonopuls HD 3200

Výkonný stolní ultrazvukový homogenizátor, který je určen pro výzkumné účely. Především pro homogenizaci, dispergaci, rozrušování aglomerátů a mnoho dalších. Tento model má rozšířené funkce, kdy je možné nastavit si vlastní amplitudu, výkon, pulzaci nebo čas homogenizace. Přístroj je vhodný pro objemy 1 – 1000 ml. V našem případě jsme byli omezeni velikostí rozetové nádoby RZ3 100 ml. Výkon generátoru je 200 W. [30]

Ultrazvukový homogenizátor funguje na principu generace ultrazvuku a přenášení vysoké frekvence a amplitudy do kapaliny. Přístroj Sonopuls HD 3200 od německé firmy Bandellin Electronic se skládá z následujících částí:

- Generátor – převádí nízkofrekvenční napětí na vysokofrekvenční
- Konvertor – mění vysokofrekvenční napětí na mechanickou (vibrační) energii o stejné frekvenci
- Sonotroda – slouží ke zvýšení amplitudy a nachází se mezi konvertorem a sondou
- Sonda – převádí vibrace o dané amplitudě ze zařízení do kapaliny

Nutnou součástí homogenizátoru je stojan, reakční rozetová nádoba a tvarovaná titanová sonda.



Obrázek 20: Ultrazvukový kavitátor [30]

10.3 Další použitá zařízení

K samotné výrobě zkušebních vzorků byla použita ještě následující zařízení:

- Laboratorní talířová míchačka s nuceným oběhem pro beton
- Vibrační stůl s magnetickým upínáním forem Beton Systém
- Laboratorní váhy s přesností na 0,01 g
- Analytické váhy Sartorius s přesností na 0,0001 g
- Zkušební lis pro stanovení pevností
- Abramsův kužel
- Zařízení pro mrazuvzdornost betonu
- Terče o průměru 50 mm pro stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu
- Odtrhový přístroj DYNA Z 16.

11. Zkušební metody pro stanovení vlastností betonů

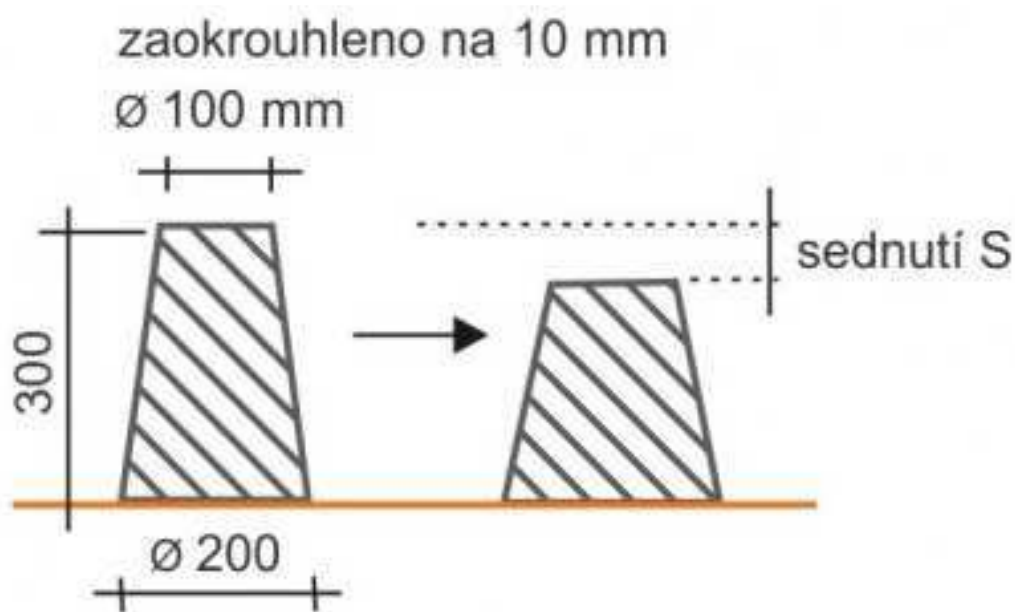
11.1 Zkouška sednutím

- ČSN EN 12 350 – 2: 2009 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2

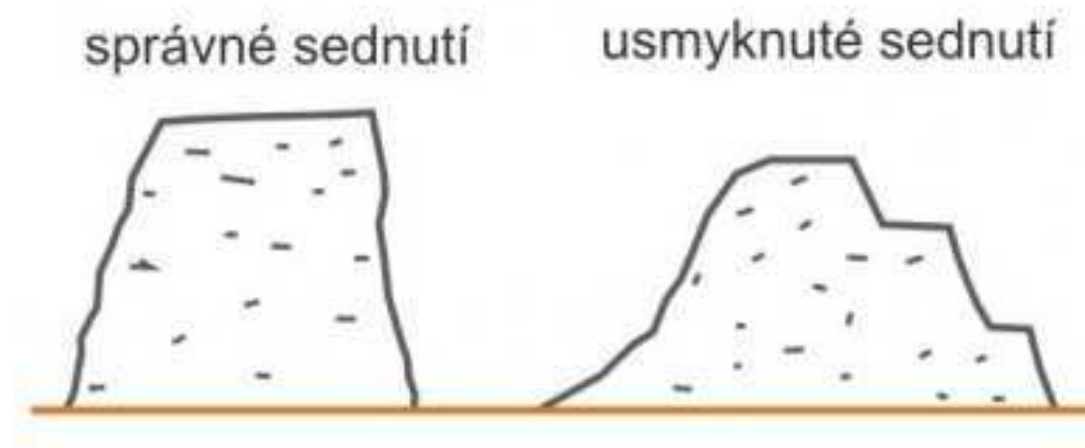
Sednutí kužele je zkouška pro měření konzistence betonu. Podle velikosti sednutí se beton rozdělí do pěti tříd, viz tabulka 8. [31]

Tabulka 8: Třídy sednutí betonu

Označení	Sednutí
S1	10 – 40 mm
S2	50 – 90 mm
S3	100 – 150 mm
S4	160 – 210 mm
S5	≥ 220 mm



Obrázek 21: Rozměry Abramsova kužele [32]



Obrázek 22: Zkouška sednutí [32]

11.1.1 Postup zkoušky

Navlhčený Abramsův kužel o rozměrech viz obrázek 18, se položí na navlhčenou desku. Plnění probíhá pomocí násypky ve třech vrstvách. Každá vrstva se zhutňuje 25 vpichy navlhčenou propichovací tyčí. Po naplnění kužele se zarovná povrch a následně se odformuje. Odformování probíhá zvedáním formy, které by nemělo trvat déle než 5 s. Poté se forma obrátí a přiloží ke kuželu betonu. Pravítkem se změří výška sednutí. Výsledné sednutí se zaokrouhluje na 10 mm. Provádění celé zkoušky by nemělo trvat déle než 150 s. [31]

11.2 Pevnost v tlaku

- ČSN EN 12 390 – 3: 2009 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3

Zkouška pevnosti v tlaku se provádí na krychli, válci nebo na vhodném kusu zlomeného trámce. Vždy se zkouší minimálně tři tělesa. Před porušením tělesa se ověří geometrie tělesa. Těleso se vkládá do lisu kolmo na směr strany hutnění. Zvyšuje se tlak až do prvního porušení ztráty pevnosti. Poté se na přístroji odečte síla, z které se vypočítá pevnost v tlaku. [33]

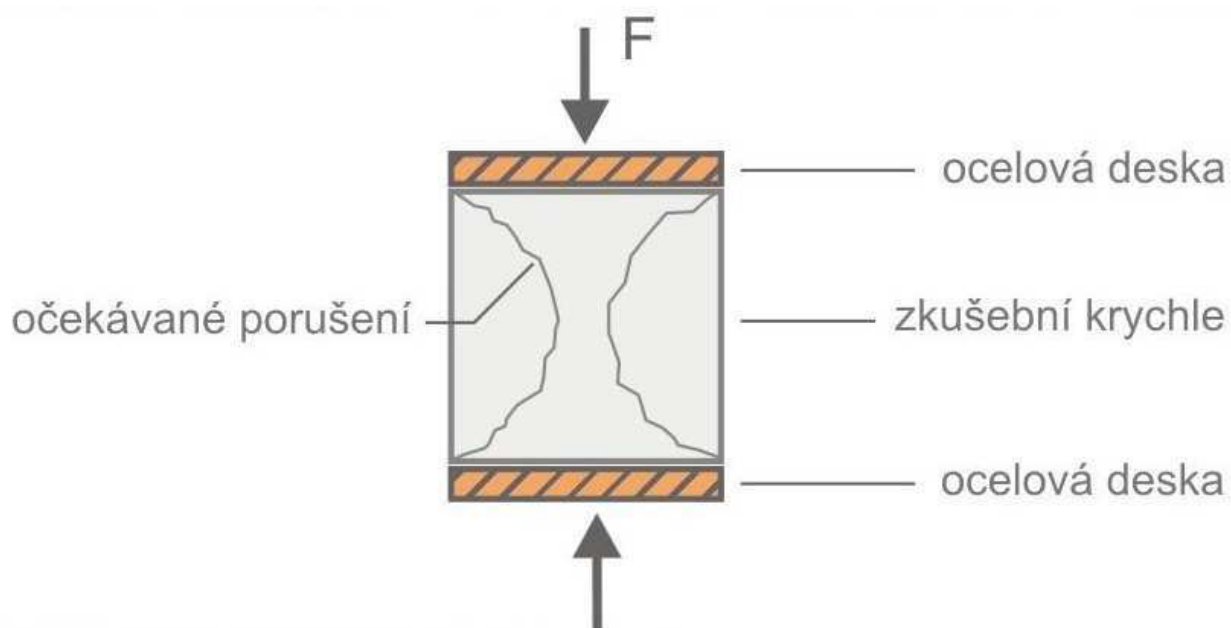
11.2.1 Výpočet

$$f_c = \frac{F}{A_c} [MPa]$$

Kde:

F - maximální zatížení při porušení [N]

A_c - průřezová plocha zkušebního tělesa, vypočtená ze jmenovité velikosti tělesa, nebo ze změřených rozměrů tělesa [mm²]



Obrázek 23: Zkouška pevnosti v tlaku [34]

11.3 Pevnost v tahu ohybem

- ČSN EN 12 390 – 5: 2009 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5

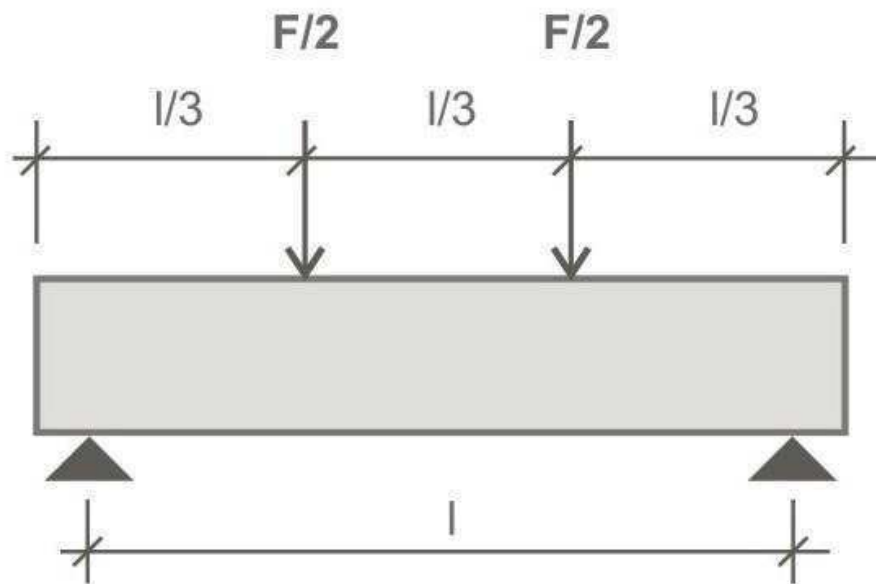
Zkouška pevnosti v tahu za ohybu se provádí na trémkách o rozměrech 100 × 100 × 400 mm. Podle způsobu zatížení se jedná o tří, nebo čtyřbodové uspořádání. V tomto případě se používalo čtyřbodové, které má vyšší vypovídající hodnotu o pevnosti v betonu v tahu za ohybu. Těleso se poruší ve střední třetině mezi oběma silami od zatížení. Protože jsou v této části nosníku při uvedeném zatížení posouvající síly rovny nule, dojde k porušení v oblasti namáhání čistým ohybem. [35]

11.3.1 Výpočet

$$f_{cf} = \frac{F_{cf} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} [MPa]$$

Kde:

- F_{cf} - maximální zatížení [N]
 d_1, d_2 - příčné rozměry tělesa [mm]
 l - vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]



Obrázek 24: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu [36]

11.4 Pevnost v příčném tahu

- ČSN EN 12 390 – 6: 2009 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6

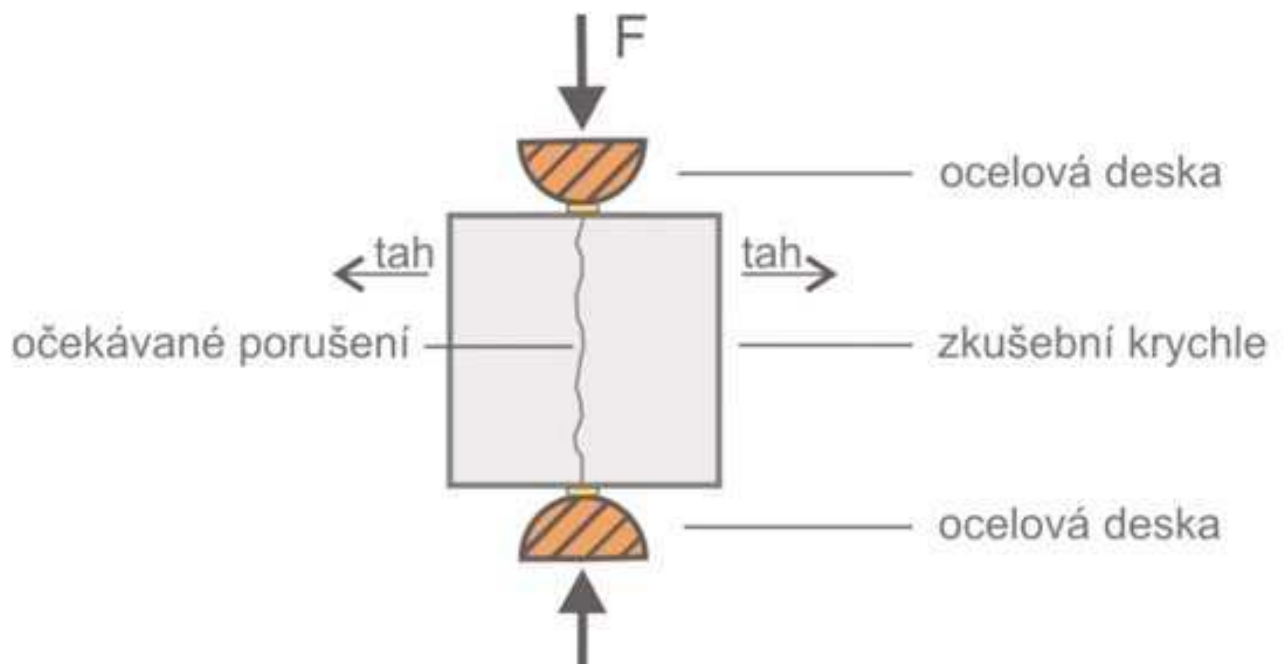
Tato zkouška se provádí na krychli, válci nebo výjimečně na jádrových vývrtech. Zkušební těleso je v tomto případě zatěžováno liniově. Tahová napětí jsou při zkoušce vyvozována nepřímo prostřednictvím tlakového zatížení. [37]

11.4.1 Výpočet

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F_{ct}}{\pi \cdot L \cdot d} [MPa]$$

Kde:

- F_{ct} - maximální zatížení [N]
 L - délka dotykové přímky tělesa [mm]
 d - zvolený příčný rozměr tělesa [mm]



Obrázek 25: Pevnost v příčném tahu [38]

11.5 Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu

- ČSN 73 1318 – Stanovení pevnosti betonu v tahu, Příloha D.

Zkouška pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu v tahu se provádí na betonových zkušebních tělesech. Odtrhové zkoušky slouží ke stanovení přídržnosti povrchových vrstev na nosném podkladu, nebo na zjištění tahové pevnosti povrchových i podpovrchových vrstev betonu. Na povrch betonu se kvalitním lepidlem nalepí upravený terč o průměru 50 mm. Jádrovým vrtákem s vnitřním průměrem 50 mm se navrtá beton do požadované hloubky zkoušeného betonu. Poté se terč uchyty do trhacího přístroje a provede se zkouška v osovém tahu. [39]

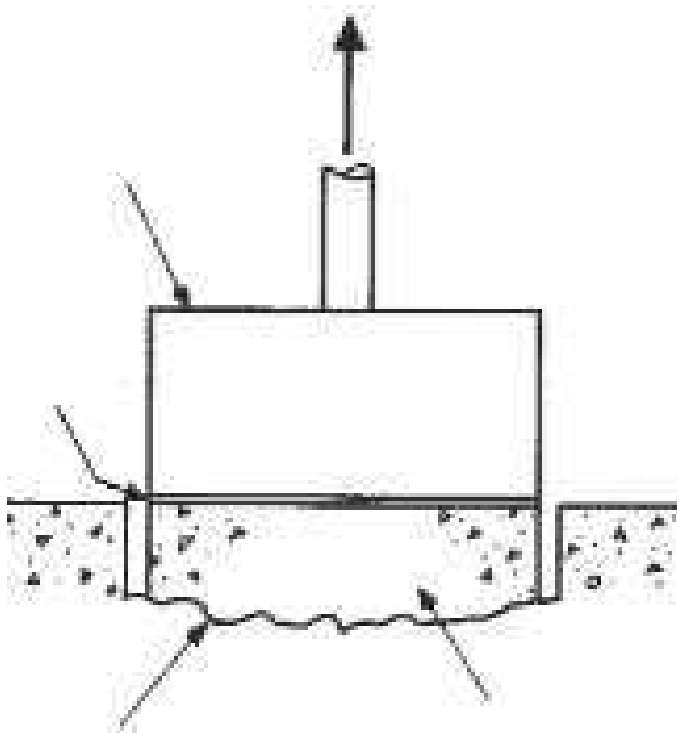
11.5.1 Výpočet

$$R_t = \frac{F}{A} [MPa]$$

Kde:

F - největší dosažená síla [N]

A - plocha zkušebního terče [mm²]



Obrázek 26: Odtrhová zkouška na betonu [39]

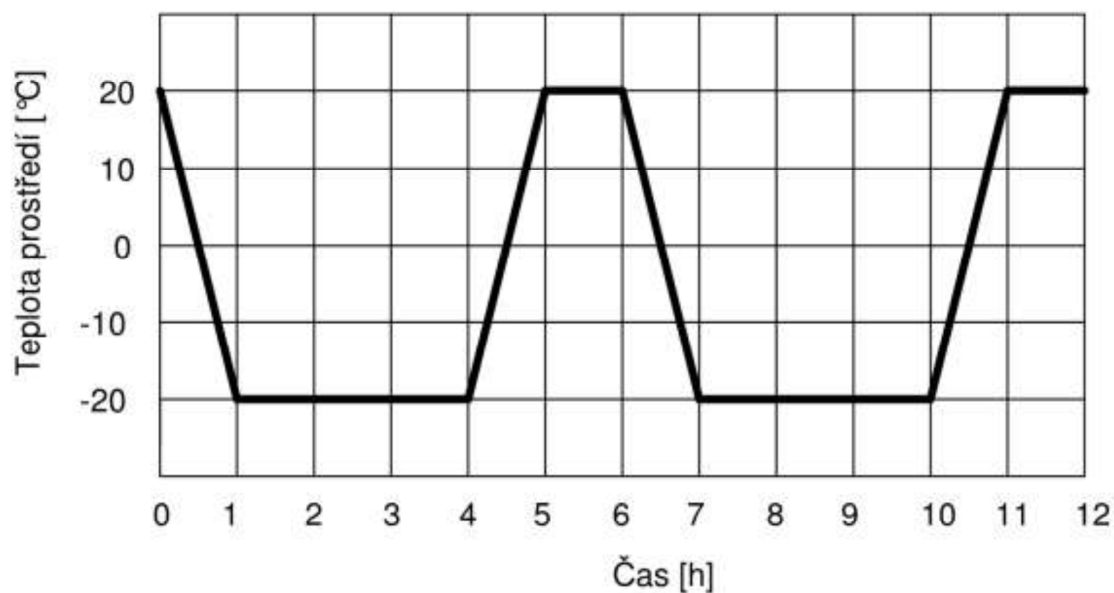
11.6 Mrazuvzdornost betonu

- ČSN 73 1322 – Stanovení mrazuvzdornosti betonu

Zkouška mrazuvzdornosti se provádí na betonových trámcích o rozměrech 100 × 100 × 400 mm. Trámce jsou uloženy 25 dní ve vlhkém prostředí a 3 dny ve vodním prostředí dle ČSN 73 1316. Pokud se vzorky zkouší ve stáří 60 dní, jsou 57 dní ve vlhkém prostředí a 3 dny ve vodě. [40]

Zkušební vzorky jsou cyklicky zmrazovány na teplotu -15 °C až -20 °C. Následně jsou rozmrazovány na teplotu +15 °C až 22 °C. Jeden cyklus trvá 6 hodin. Vzorky se zkouší na 50, 100 nebo 150 cyklů, přičemž po daném

počtu cyklů se vzorek zváží pro určení hmotnostního úbytku. Poté se provede zkouška pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 12 390 – 5 na zkoušených i referenčních tělesech. Součinitel mrazuvzdornosti se určí jako poměr pevnosti zmrazovaných těles k pevnosti referenčních. V případě menšího než 75 % je zkoušený beton označen za nemrazuvzdorný. [40]

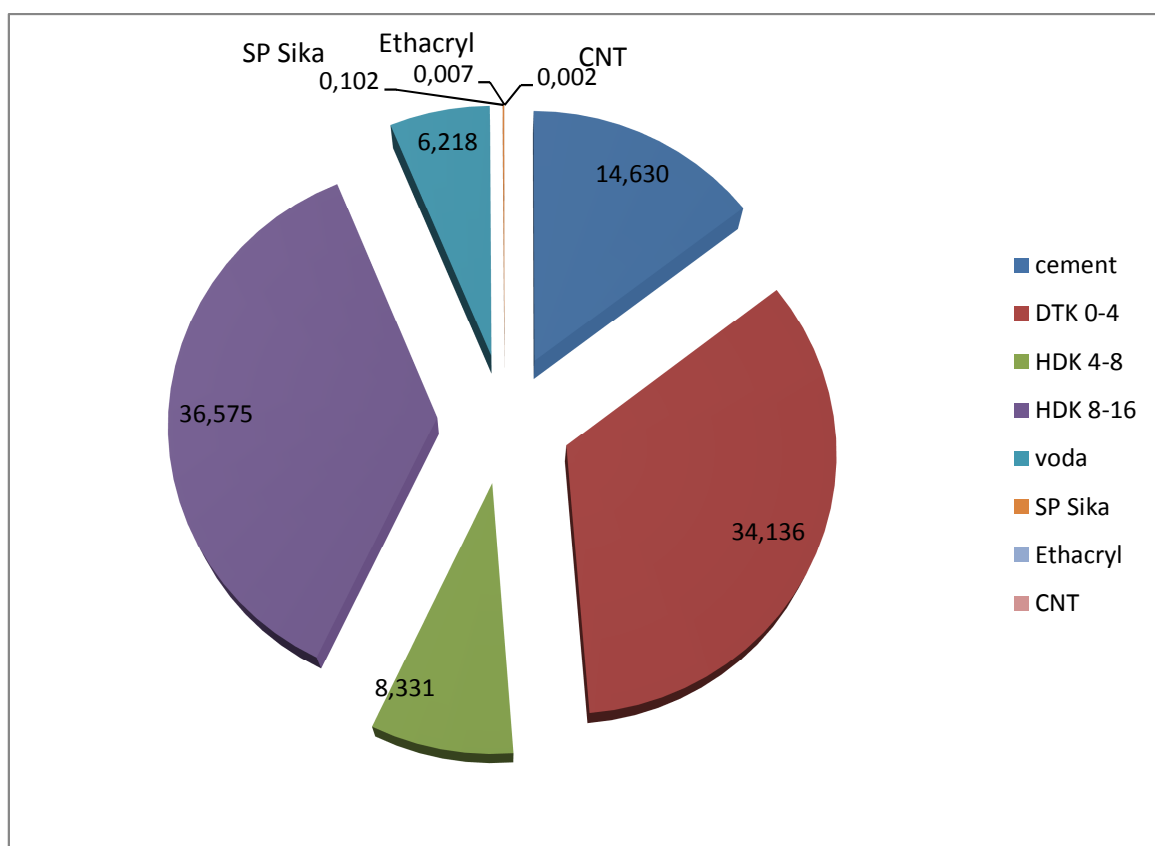


Obrázek 27: Průběh v závislosti na čase dle ČSN 73 1322 [40]

12.Navržená receptura

Uhlíkové nanotrubičky jako rozptýlená výztuž se dávkuje v množství až do 0,1 %. Pro tento experiment byly zvoleny různé dávky a to 0,0015, 0,006 a 0,012 % z hmotnosti cementu. Každá dávka nanotrubiček byla dispergována v roztoku, který obsahoval povrchově aktivní látku. Dávkování těchto látek je empirickou záležitostí. Udává se, že množství povrchově aktivních látek se pohybuje v rozmezí od 10 % do 700 % hmotnosti CNT. V tomto případě byla zvolena dávka 400 % hmotnosti CNT, tedy poměr povrchově aktivní látka:CNT = 4:1.

Stanovení vlastností vzorků bylo prováděno po 7 a 28 dnech. Ke každé záměsi byla vytvořena záměs referenční, která měla stejnou dávku všech surovin, pouze neobsahovala uhlíkové nanotrubičky. Receptura je uvedena v tabulce 10.



Graf 1: Poměr složek ve směsi v %

Tabulka 9: Poměr složek v betonu

složka	[kg]	[%]
cement	360	14,630
DTK 0-4	840	34,136
HDK 4-8	205	8,331
HDK 8-16	900	36,575
voda	153	6,218
SP Sika	2,5	0,102
Ethacryl	0,173	0,007
CNT	0,043	0,002
celkem	2460,716	100

Tabulka 10: Receptura

Vstupní složky		jednotky	1 m ³	27 l
CEM I 42,5 R		[kg]	360	9,72
Kamenivo	DTK 0-4 mm Žabčice	[kg]	840	22,68
	HDK 4-8 mm Olbramovice	[kg]	205	5,54
	HDK 8-16 mm Olbramovice	[kg]	900	24,3
Voda		[kg]	153	4,12
Plastifikační přísada Sika Viscocrete 4035 (SP)		[kg/% z m _c]	2,5 (0,69 %)	0,0675
Plastifikační přísada Ethacryl HF		[g/% z m _c]	172,8 (0,048 %)	4,6656
0,0015		[g/% z m _c]	5,4 (0,0015 %)	0,1458
CNT 0,006		[g/% z m _c]	21,6 (0,006 %)	0,5832
0,012		[g/% z m _c]	43,2 (0,012 %)	1,1664

12.1 Označení vzorků:

REF	záměs bez CNT, s dávkou plastifikační přísady Ethacryl HF 0,048 % z hmotnosti cementu
CNT0,0015	záměs s 0,0015 % CNT z hmotnosti cementu, s dávkou plastifikační přísady Ethacryl HF 0,006 % z hmotnosti cementu
CNT0,006	záměs s 0,006 % CNT z hmotnosti cementu, s dávkou plastifikační přísady Ethacryl HF 0,024 % z hmotnosti cementu
CNT0,012	záměs s 0,012 % CNT z hmotnosti cementu, s dávkou plastifikační přísady Ethacryl HF 0,048 % z hmotnosti cementu

13. Příprava vzorků

13.1 Příprava suspenze

Prvním krokem bylo navážení superplastifikační přísady a uhlíkových nanotrubiček na analytických vahách s přesností na čtyři desetinná místa. Množství potřebné vody bylo naváženo na laboratorních vahách s přesností na dvě desetinná místa.

Dispergace pomocí ultrazvukového kavitátoru Bandelin Sonopuls HD 3200 je limitována velikostí rozetové nádoby RZ3 o objemu 100 ml. Z tohoto důvodu se míchání u záměsi CNT0,006 muselo míchat na čtyřikrát a záměs CNT0,012 byla míchána osmkrát.

- Jelikož záměsi obsahovaly superplastifikační přísadu, bylo nezbytné ji nejprve důkladně rozpustit ve vodě. Homogenizace vody a superplastifikační přísady byla provedena na magnetickém míchadle při 500 otáčkách za minutu.
- Do kádinky s vodou a superplastifikační přísadou bylo přidáno přesně navážené množství uhlíkových nanotrubiček. Pro lepší rozdělení větších shluků CNT a dosažení lepší předpřípravy suspenze před samotnou dispergací ultrazvukem byla tato směs dále míchána 5 minut na magnetickém míchadle.
- Dále byla tato suspenze přelita do rozetové nádoby a uložena do ledové lázně. Kdyby suspenze nebyla chlazena, docházelo by k nepřiměřenému zahřívání disperze, což by vedlo ke shlukování a horší dispergaci CNT.
- Byla nastavena amplituda ultrazvukového kavitátoru na 72 % a byla zahájena dispergace. Dispergace trvala do doby dosažení dispergační energie 65 kJ.
- Po dosažení dispergační energie byl obsah rozetové nádoby v případě záměsi CNT0,006 a CNT0,012 přelit kádinky a umístěn na magnetické míchadlo, dokud se celý postup v případě záměsi CNT0,006 neprovedl čtyřikrát a v případě záměsi CNT0,012 osmkrát.
- Následně byla suspenze dávkována do betonu.



Obrázek 28: Dispergace CNT

13.2 Výroba betonu

- Dle receptury byly přesně naváženy jednotlivé suroviny do betonové směsi.
- Do laboratorní talířové míchačky s nuceným oběhem bylo nejprve dávkováno navážené kamenivo od nejhrubší frakce po nejjemnější.
- Kamenivo bylo krátce promícháno, poté byl přidán cement a opět byly suché složky krátce promíchány pro lepší homogenizaci.
- Dále byla přidána voda se superplastifikační přísadou.
- Po dostatečném promíchání byly do směsi nality již rozdispergované CNT a následně se opět řádně směs promíchala.
- U směsi s CNT byla voda dovažována dle určité receptury, tak aby každá záměs obsahovala stejné množství vody a superplastifikační přísady jako záměs referenční.



Obrázek 29: Suspenze CNT a navážené množství superplastifikační přísady pro recepturu CNT0,006

- Na čerstvém betonu byla provedena zkouška sednutí Abramsova kužele.
- Po homogenizaci v kolečku bylo naplněno šest forem o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm.



Obrázek 30: Zkušební vzorky v ocelových formách

14. Vyhodnocení zkoušek

14.1 Zkouška sednutí

Zkouška sednutí byla prováděna těsně po zamíchání každé záměsi betonu. Receptura betonu byla navržena na konzistenci betonu S3 sednutí kužele. V tom případě by měla dosahovat sednutí 100–150 mm.

Při měření bylo dosaženo výsledků 120 až 130 mm sednutí. Proto mohu tvrdit, že tento požadavek byl splněn a namíchané receptury měly vždy stejnou třídu konzistence betonu.

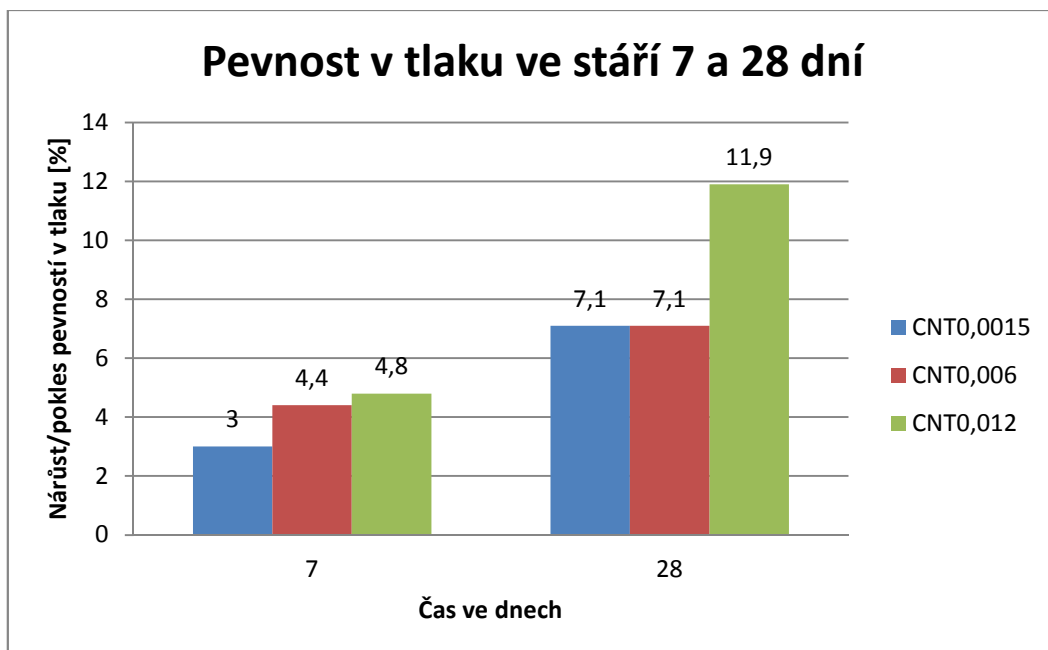
14.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla prováděna na vzorcích ve stáří 7 a 28 dní. Výsledná pevnost betonu byla průměrem šesti naměřených pevností. Ke každé sadě vzorků byla vyrobena záměs referenční pro porovnání výsledků.

V tabulkách je vedle výsledných hodnot pevností také procentuální nárůst nebo pokles pevností s ohledem na referenční pevnost vzorku. Pro snadnější orientaci budou nárůsty pevností označeny barvou zelenou a poklesy pevností barvou červenou.

Tabulka 11: Pevnosti v tlaku betonové směsi ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny oproti pevnosti v tlaku referenčních vzorků – zkouška provedena na zlomcích trámů

Označení vzorku	Pevnost v tlaku [MPa]		Nárůst/pokles pevností [%]	
	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 7 dnech	Po 28 dnech
REF	50,0	58,0		
CNT0,0015	51,5	62,1	+3,0	+7,1
CNT0,006	52,2	62,1	+4,4	+7,1
CNT0,012	52,4	64,9	+4,8	+11,9



Graf 2: Procentuální změna pevností v tlaku betonové směsi vyztužené uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tlaku referenčních vzorků v 7 a 28 dnech.



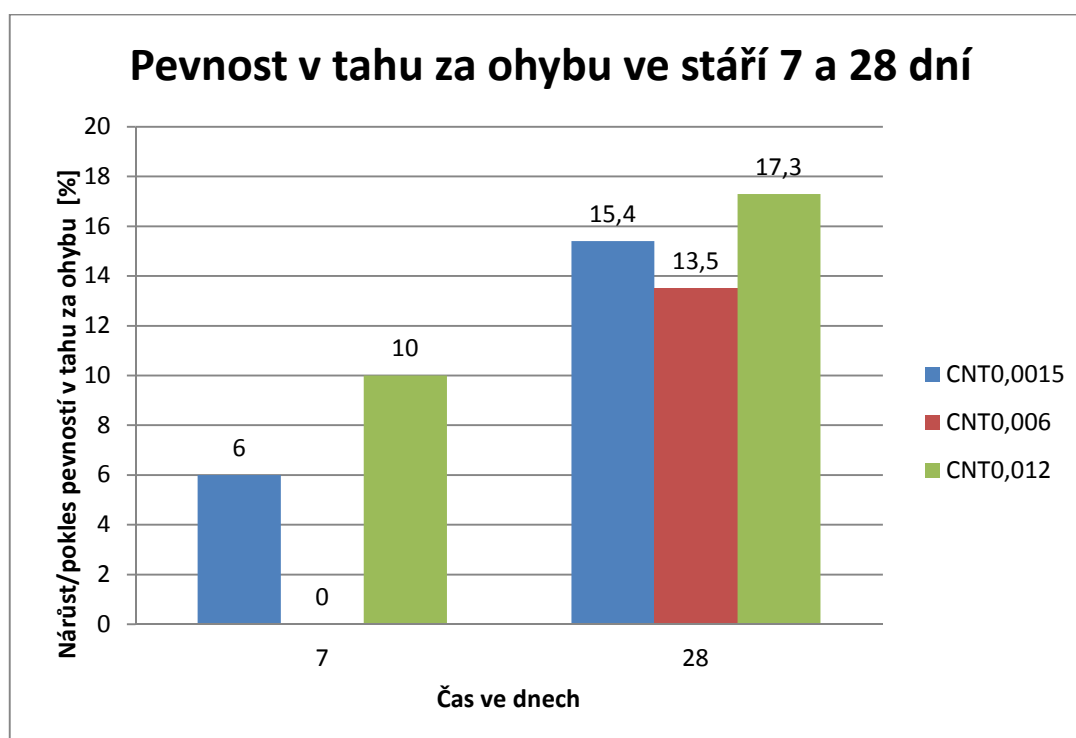
Obrázek 31: Zkouška pevnosti v tlaku na zlomcích trámů

14.3 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu ohybem byla rovněž prováděna na vzorcích ve stáří 7 a 28 dní. Výsledná pevnost betonu byla rovněž průměrem šesti naměřených pevností. Ke každé sadě vzorků byla vyrobena záměs referenční pro porovnání výsledků.

Tabulka 12: Pevnosti v tahu za ohybu betonové směsi ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny oproti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků.

Označení vzorku	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]		Nárůst/pokles pevností [%]	
	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 7 dnech	Po 28 dnech
REF	5,0	5,2		
CNT0,0015	5,3	6,0	+6,0	+15,4
CNT0,006	5,0	5,9	0	+13,5
CNT0,012	5,5	6,1	+10,0	+17,3



Graf 3: Procentuální změna pevností v tahu za ohybu betonové směsi vyztužené uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků v 7 a 28 dnech.



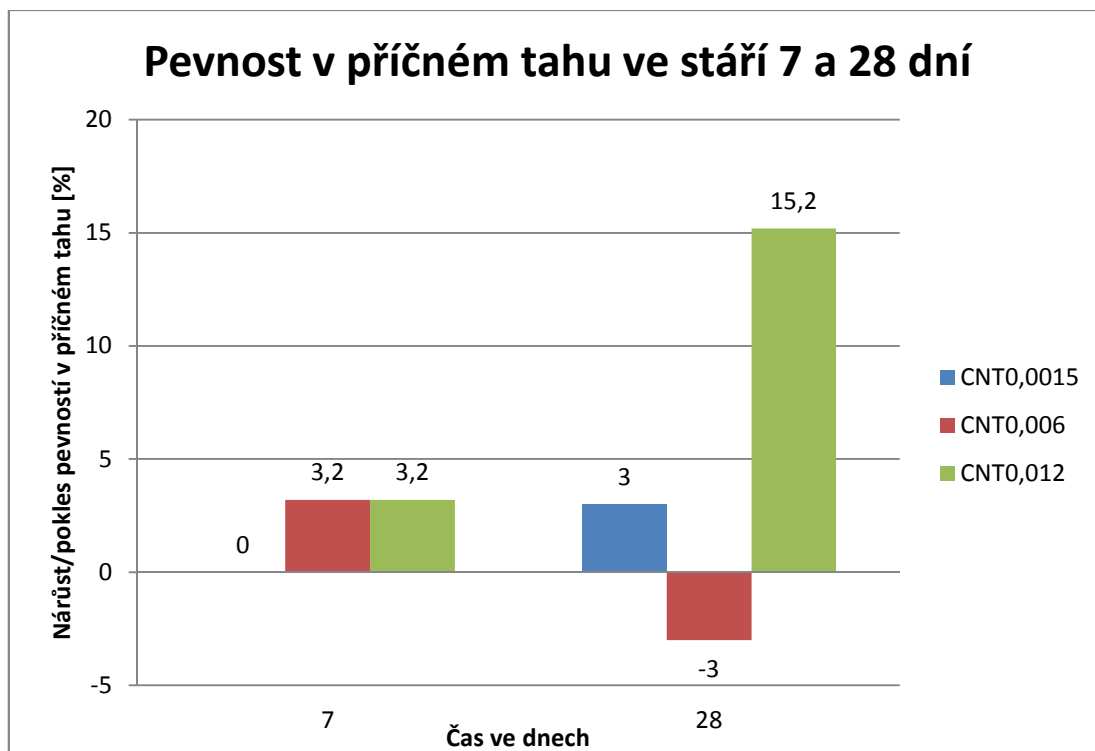
Obrázek 32: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

14.4 Pevnost v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu byla prováděna na zlomcích trámů ve stáří 7 a 28 dní. Výsledná pevnost betonu byla průměrem šesti naměřených pevností. Ke každé sadě vzorků byla vyrobena záměs referenční pro porovnání výsledků.

Tabulka 13: Pevnosti v příčném tahu betonové směsi ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny oproti pevnosti v příčném tahu referenčních vzorků.

Označení vzorku	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]		Nárůst/pokles pevností [%]	
	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 7 dnech	Po 28 dnech
REF	3,1	3,3		
CNT0,0015	3,1	3,4	0	+3,0
CNT0,006	3,2	3,2	+3,2	-3,0
CNT0,012	3,2	3,8	+3,2	+15,2



Graf 4: Procentuální změna pevností v tahu za ohybu betonové směsi vyztužené uhlíkovými nanotrubkami proti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků v 7 a 28 dnech.



Obrázek 33: Zkoušení pevnosti v příčném tahu

14.5 Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu

Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu byla prováděna na zlomcích trámů ve stáří 7 a 28 dní. Výsledná pevnost betonu byla průměrem tří naměřených pevností. Na každý zlomek trámce z každé receptury, byly nalepeny tři zkušební terče pro zkoušení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu.

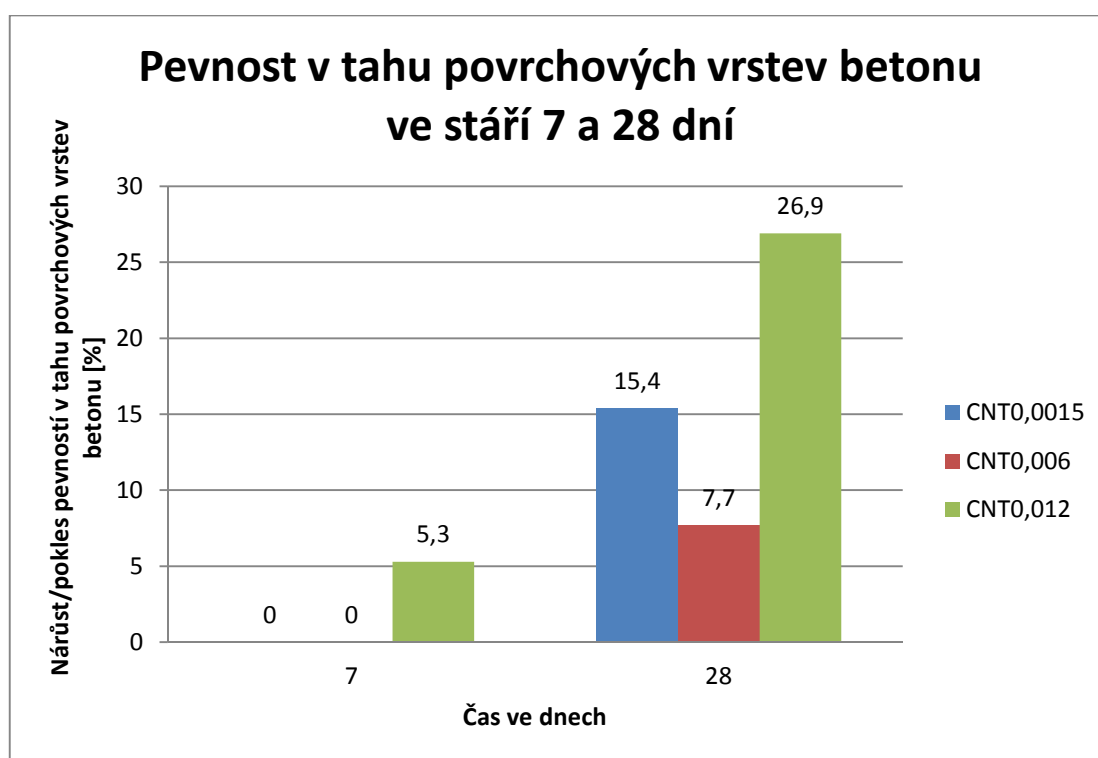
Nejprve byly zkušební terče nalepeny v přiměřené vzdálenosti na zkušební vzorek. Dva terče byly nalepeny na spodní stranu a jeden na boční stranu trámce. Po 24 hodinách, kdy lepidlo je zcela vytvrzené, byly zkušební terče ořezány diamantovým kotoučem. Nařezané vzorky s nalepenými terči můžeme vidět na obrázku 34.



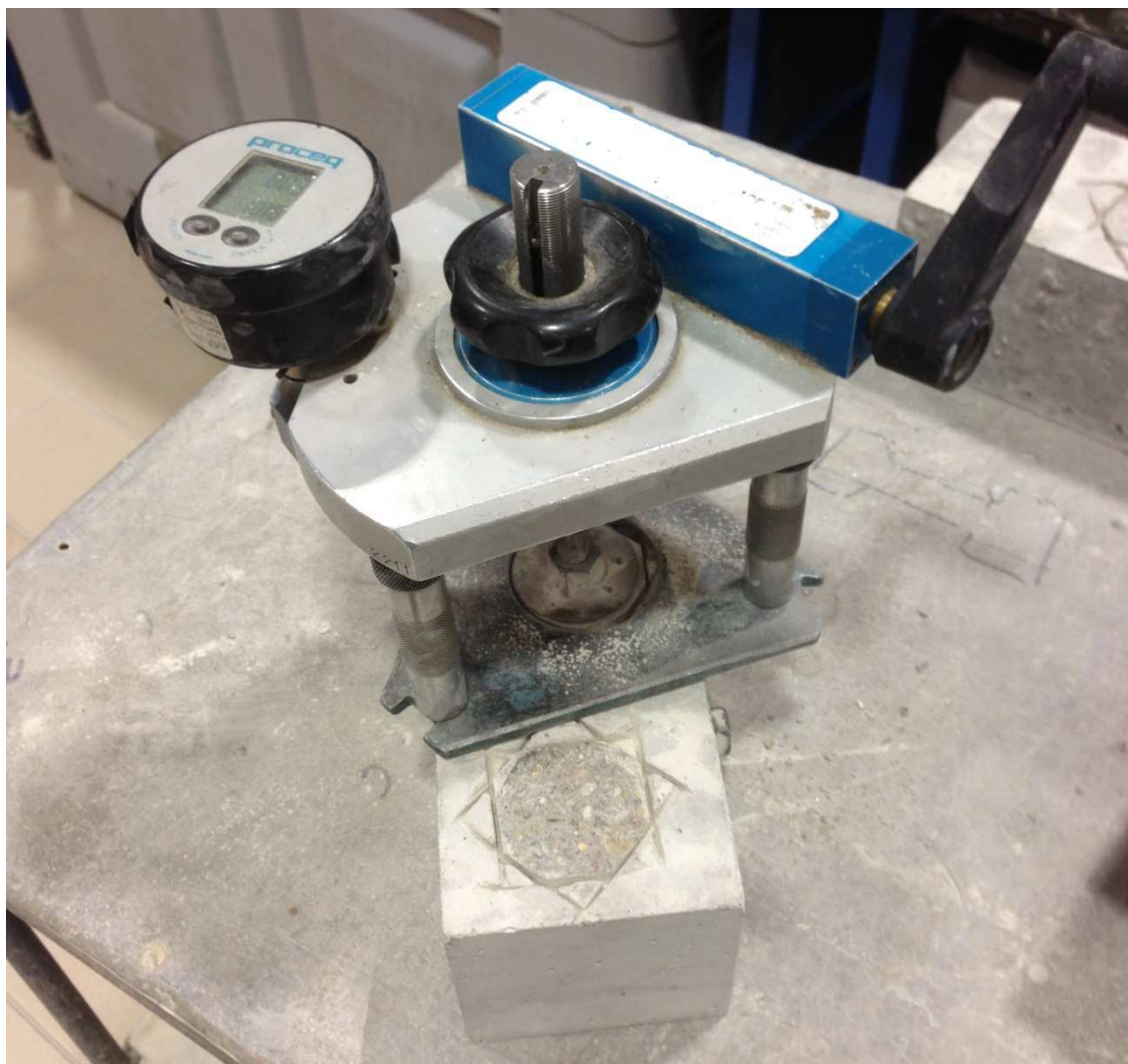
Obrázek 34: Připravené vzorky na zkoušku pevností v tahu povrchových vrstev betonu

Tabulka 14: Pevnosti v tahu povrchových vrstev betonové směsi ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny oproti pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu referenčních vzorků.

Označení vzorku	Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu [MPa]		Nárůst/pokles pevností [%]	
	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 7 dnech	Po 28 dnech
REF	1,9	2,6		
CNT0,0015	1,9	3,0	0	+15,4
CNT0,006	1,9	2,8	0	+7,7
CNT0,012	2,0	3,3	+5,3	+26,9



Graf 5: Procentuální změna pevností v tahu povrchových vrstev betonu vyztužený uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu referenčních vzorků v 7 a 28 dnech.



Obrázek 35: Zkouška pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu za použití přístroje DYN



Obrázek 36: Dokončené odtrhy vlevo; vpravo ukázka odtrhaných terčů, kdy je vidět, že k porušení došlo vždy v povrchu betonu

14.6 Mrazuvzdornost betonu

Tabulka 15: Pevnost v tahu za ohybu pro zkoušku mrazuvzdornosti betonu ve stáří 28 dní a porovnání se vzorky nezmrazovanými. Pro zmrazovaná tělesa je označení M, pro nezmrazovaná tělesa platí označení N.

Označení vzorku	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	
	M	N
REF	7,0	7,1
CNT0,0015	7,2	7,2
CNT0,006	7,4	7,2
CNT0,012	7,6	7,3

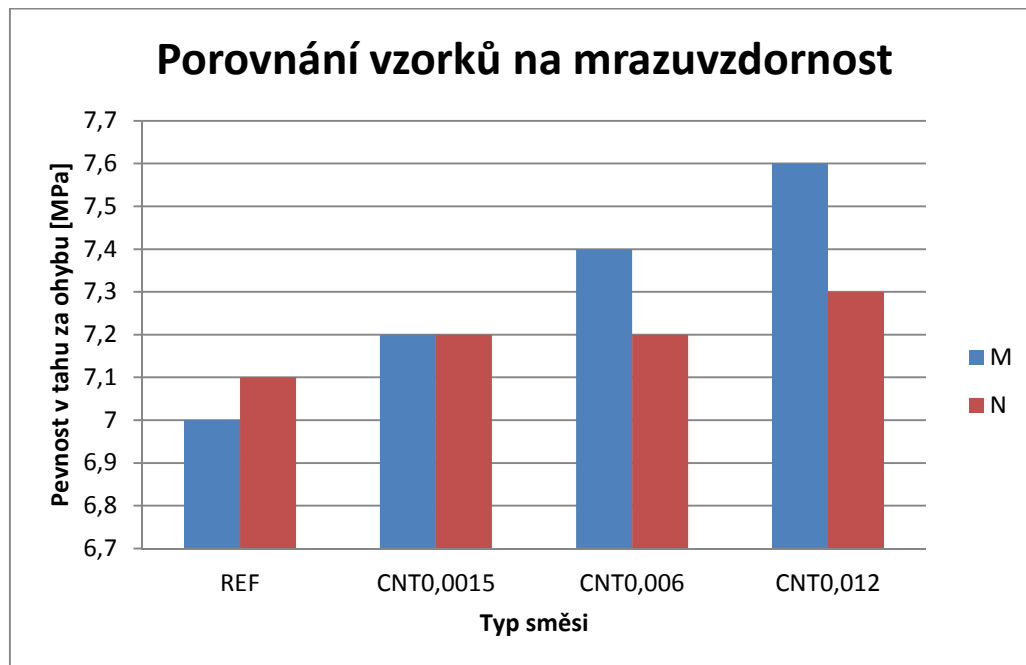
13.6.1 Vyhodnocení mrazuvzdornosti betonu

$$\text{REF: } \frac{REF-M}{REF-N} \cdot 100 = \frac{7,0}{7,1} \cdot 100 \cong 98,6 \% > 75\%$$

$$\text{CNT0,0015: } \frac{CNT0,0015-M}{CNT0,0015-N} \cdot 100 = \frac{7,2}{7,2} \cdot 100 \cong 100,0 \% > 75\%$$

$$\text{CNT0,006: } \frac{CNT0,006-M}{CNT0,006-N} \cdot 100 = \frac{7,4}{7,2} \cdot 100 \cong 102,8 \% > 75\%$$

$$\text{CNT0,012: } \frac{CNT0,012-M}{CNT0,012-N} \cdot 100 = \frac{7,6}{7,3} \cdot 100 \cong 104,1 \% > 75\%$$



Graf 6: Pevnosti v tahu za ohybu při zkoušce mrazuvzdornosti – M (zmrazovaná tělesa), N (porovnávací nezmrazovaná tělesa)

Tabulka 16: Porovnání pevností při zkoušce mrazuvzdornosti a jejich nárůst nebo pokles oproti vzorkům referenčním.

Označení vzorku	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]		Nárůst/pokles pevností [%]	
	M	N	M	N
REF	7,0	7,1		
CNT0,0015	7,2	7,2	+2,9	+1,4
CNT0,006	7,4	7,2	+5,7	+1,4
CNT0,012	7,6	7,3	+8,6	+2,8

15. Diskuse výsledků

V experimentální části byly používány vícestěnné uhlíkové nanotrubičky od firmy Yurui Chemical Co., LDT, Shangai. Na základě poznatků z rešerší a dřívějších experimentů bylo zvoleno dávkování uhlíkových nanotrubiček 0,0015, 0,006 a 0,012 % z hmotnosti cementu. Povrchově aktivní látkou byla zvolena superplastifikační přísada Coatex – Ethacryl HF, S.C. 40 % na bázi polykarboxylátového etheru. V tomto experimentu byla zvolena dávka povrchově aktivní látky v poměru k hmotnosti CNT 4:1.

Dispergace CNT probíhala pomocí ultrazvukového kavitátoru, kdy dodané množství energie bylo pro všechny dávky stejné a to 65 kJ. Pro jednotlivé záměsi se lišil pouze celkový objem dílčích připravených disperzí. Připravená suspenze byla poté použita k výrobě betonu. Z každé receptury betonu byla vyrobena zkušební tělesa, na kterých byly provedeny následující stanovení: zkouška sednutí, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v příčném tahu, pevnost v tahu povrchových vrstev betonu a mrazuvzdornost betonu po 100 cyklech. Sledování pevnostních charakteristik bylo prováděno ve stáří 7 a 28 dní.

Při zkoušce sednutí kužele bylo dosaženo požadované konzistence betonu třídy S3, kdy sednutí se pohybovalo v rozmezí od 100 do 150 mm. Konkrétní sednutí u namíchaných betonových směsí bylo 120 až 130 mm.

Při zkoušce pevnosti v tlaku se změna pevností vzorků s CNT oproti referenčním vzorkům výrazně projevila. Nárůst pevností byl zaznamenán jak po 7 tak i po 28 dnech. Nejvyššího nárůstu po 7 dnech bylo dosaženo u receptury CNT0,012, která obsahovala 0,012 % CNT z hmotnosti cementu, a to o 4,8 % oproti vzorkům referenčním. Po 28 dnech zrání bylo opět dosaženo nejvyššího nárůstu u té samé receptury, který byl o 11,9 % vyšší oproti referenčním vzorkům. Pevnost v tlaku je pravděpodobně ovlivněna chováním uhlíkových nanotrubiček, tím že struktura betonu je hutnější oproti referenčním vzorkům.

Další důležitou zkouškou pro vyhodnocení účinku CNT v betonu je pevnost v tahu za ohybu. Dle výzkumu Chen a Chung [41] bylo zjištěno, že pevnost v tahu v ohybu při použití krátkých uhlíkových vláken se může zvýšit až o 85 %. Při zkoušení pevností po 7 dnech byl nárůst pevností u receptury CNT0,0015 a CNT0,012. U receptury CNT0,0015 došlo k nárůstu o 6 % oproti

referenčním vzorkům a u receptury CNT0,012 o 10 %. U receptury CNT0,006 nedošlo ani k nárůstu ani k poklesu pevností. U 28 denních pevností došlo k nárůstu u všech zkoušených vzorků. A to konkrétně CNT0,0015 o 15,4 %, CNT 0,006 o 13,5 % a vzorky CNT0,012 o 17,3 %. Z dosažených výsledků lze tvrdit, že nejlepších fyzikálně-mechanických vlastností bylo dosaženo s recepturou s dávkou CNT 0,012 % z hmotnosti cementu. Nelze tvrdit, že čím více CNT betonová směs obsahuje, tím budou pevnosti vyšší. Důkazem toho je receptura CNT0,006, kdy nebylo dosaženo takového nárůstu. CNT navíc mají schopnost chovat se jako nukleační činidlo a urychlovat tvorbu C-S-H gelu.

Při stanovení pevnosti v příčném tahu po 7 dnech došlo k nárůstu o 3,2 % u receptury CNT0,006 a CNT0,012. Po 28 dnech došlo k nárůstu o 3 % u receptury CNT0,0015 a 15,2 % u receptury CNT0,012. K poklesu pevností došlo u receptury CNT0,006 a to o 3 %. Z dosažených výsledků pevnosti v příčném tahu není možné vysledovat žádnou závislost dávky CNT na pevnostní charakteristice sledovaných betonů. Je ovšem neoddiskutovatelným faktem, že zkušební vzorky s dávkou CNT dosáhly při stanovení pevností v příčném tahu nejlepších výsledků ze sledované množiny vzorků a to po 7 dnech o 3,2 % a po 28 dnech o 15,2 % oproti referenčním vzorkům.

Další zkouškou bylo stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu. Kdy se vhodným zařízením (DYNA Z 16) určuje velikost síly působící kolmo na sledovaný vzorek v okamžiku porušení. Při zkoušce pevnosti v tahu povrchových vrstev po 7 dnech byl nárůst pouze u receptury CNT0,012, a to 5,3 %. Ovšem pevnosti po 28 dnech vykazovaly značné změny. U receptury CNT0,0015 byl nárůst o 15,4 % oproti referenčním vzorkům. Receptura CNT0,006 dosáhla nárůstu o 7,7 % a receptura CNT0,012 vykazovala nárůst dokonce o 26,9 %. Z výsledků odtrhových zkoušek nevyplývá jednoznačná závislost mezi dávkou CNT a výslednou pevností. Nezpochybnitelným výsledkem ovšem je, že při dávce 0,012 % CNT z hmotnosti cementu se pevnost v tahu povrchových vrstev betonu zvýšila o cca 27 %. Zajímavá je rovněž pevnost v tahu povrchových vrstev betonu u vzorků CNT0,0015, kdy u prakticky 10× menší dávky CNT bylo dosaženo nárůstu pevností oproti referenčním vzorkům o cca 15 %.

Mrazuvzdornost je schopnost betonu nasyceného vodou vzdorovat účinkům střídavého rozmrazování a zmrazování. Zkušební vzorky byly uloženy 25 dní ve vlhkém prostředí a poté 3 dny ve vodě. Následně byly zkoušeny na 100 zmrazovacích cyklů. U referenčního betonu, který byl zmrazován (viz graf 6 na straně 63), byl zaznamenán pokles pevností, ovšem podmínku, že pevnost v tahu ohybem po zmrazování musí být větší než 75 %, splnil. Tedy i navržený referenční beton lze v tomto případě označit jako mrazuvzdorný. U ostatních receptur, které obsahovaly uhlíkové nanotrubičky, bylo možné pozorovat pozitivní vliv CNT právě v oblasti, která je v našich klimatických podmínkách kritická pro trvanlivost všech betonových konstrukcí. Zmrazované vzorky nabývaly na pevnostech oproti vzorkům nezmrazovaným. Tento fakt je možné vysvětlit tzv. dobíháním pevností, kdy mikrostruktura cementového kamene je natolik hutná, že se na ni vliv střídavého působení mrazu neprojevil. Na základě výsledků provedených zkoušek je možné tvrdit, že uhlíkové nanotrubičky zlepšují odolnost betonu proti zmrazování. Pro zmrazovaný beton je důležité jeho stáří. Rozhodujícím kritériem mrazuvzdornosti je také pórovitá struktura cementového kamene, zejména distribuce pórů zaplněných vodou.

Po vyhodnocení všech provedených zkoušek je možné tvrdit, že nejlepších fyzikálně-mechanických vlastností dosáhl beton s CNT při dávkování 0,012 % CNT z množství cementu. U většiny případů došlo k podstatnému nárůstu oproti referenčním vzorkům.

Předmětem dalšího výzkumu by mělo být odzkoušení širšího spektra dávek uhlíkových nanotrubiček.

16. Závěr

V diplomové práci v teoretické části jsou v úvodní části uvedeny informace o uhlíku jako stavebním kameni všech organických sloučenin. Následně jsou popsány uhlíkové nanotrubičky – jejich různé druhy výroby, vlastnosti a základní parametry. Další kapitolou této práce je využití uhlíkových nanotrubiček jak v betonu, tak v dalších aplikacích. Dávkování CNT do betonu a dispergace CNT bylo dalším předmětem zkoumání. Bylo charakterizováno několik metod dispergace od mechanických metod po chemické metody dispergace.

V praktické části diplomové práce byl ověřován vliv uhlíkových nanotrubiček v různých dávkách na fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu a jeho mrazuvzdornost. Pro porovnání vlastností byly vytvořeny receptury s dávkováním 0,0015 %, 0,006 % a 0,012 % uhlíkových nanotrubiček z množství cementu. K těmto recepturám byla vytvořena záměs referenční, se kterou byly výsledky porovnávány.

Závěrem lze konstatovat, že CNT a celkově nanomateriály mají velký potenciál ve stavebnictví. Důležitým faktorem pro správné použití je jejich dispergace, která musí být bezchybná. Limitujícím faktorem pro využívání CNT do betonu je jejich vysoká pořizovací cena. Nejlepších souhrnných výsledků při stanovení fyzikálně-mechanických vlastností bylo dosaženo se vzorky, které obsahovaly 0,012 % CNT z hmotnosti cementu. Ovšem nelze pominout příznivé výsledky u zkušebních vzorků s dávkou CNT téměř 10× nižší, které jsou slibným potenciálem vzhledem k stále ještě nezanedbatelným pořizovacím nákladům uhlíkových nanotrubiček.

17. Technické listy použitých materiálů

Technický list – Portlandský cement CEM I 42,5 R Mokrý

CEM I 42,5 R Portlandský cement EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrý

Technický list

červen 2016

Fyzikální a mechanické vlastnosti				
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	14	EN 196-1	
	2 dny	29	EN 196-1	
	7 dní	51	EN 196-1	
	28 dní	61	EN 196-1	
	56 dní	66	EN 196-1	
	90 dní	67	EN 196-1	
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4	EN 196-1	
	2 dny	6	EN 196-1	
	7 dní	8	EN 196-1	
	28 dní	9	EN 196-1	
	56 dní	9	EN 196-1	
	90 dní	9	EN 196-1	
Normální konzistence [%]		27,7	EN 196-3	
Počátek tuhnutí [min]		201	EN 196-3	
Konec tuhnutí [min]		264	EN 196-3	
Objemová stálost [mm]		0,8	EN 196-3, Le Chatelier	
Měrný povrch [m ² .kg ⁻¹]		381	EN 196-6, Blaine	
Hydratační teplo [J.g ⁻¹]		7 dní	310	EN 196-8

Chemické vlastnosti			
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka
Obsah [%]	CaO	64,2	EN 196-2
	SiO ₂	19,5	EN 196-2
	Al ₂ O ₃	4,7	EN 196-2
	Fe ₂ O ₃	3,2	EN 196-2
	MgO	1,3	EN 196-2
	SO ₃	3,2	EN 196-2
	Cl ⁻	0,047	EN 196-2
	K ₂ O	0,78	EN 196-2
	Na ₂ O	0,09	EN 196-2
Na ₂ O ekvivalent [%]		0,6	EN 196-2
Nerozpustný zbytek [%]		0,7	EN 196-2
Ztráta žiháním [%]		3,3	EN 196-2

Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	95-100 %
Doplňující složka	0-5 %	

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří siran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404

Bez rizika	Koroze způsobená karbonatací				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ^{a)}	✓ ^{a)}	✓	✓	✓

a) Při chemické siranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 - koncentrace siranových iontů SO₄²⁻ vyšší než 600 mg/litr v podzemní vodě nebo 3000 mg/kg (v případě kapilárního sání 2000 mg/kg) v rostlé zemině - se musí použít siranovzdorný cement SR. Při obsahu SO₄²⁻ - do 1500 mg/litr je možné použít CEM I s dostatečnou dávkou pucolánové příměsi (například alespoň 20 % popílku).

V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr⁶⁺ v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).

Hodnoty uvedené v technickém listu mají čistě informativní charakter a mohou se lišit od hodnot konkrétních vzorků. Před jejich porovnáním s vlastnostmi jiných výrobků se prosím ujistěte, že všechna porovnávaná data byla získána pomocí totožných zkušebních postupů. V případě pochybností nás neváhejte kontaktovat.

Českomoravský cement, a.s.
Technická podpora prodeje
technicka.podpora@cmcem.cz
+420 544 122 544

www.cmcem.cz

**ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT**
BEROLINGCEMENT Group

Technický list – ETHACRYL HF

CONSTRUCTION

ETHACRYL™ HF

Polycarboxylate Ether for Concrete Admixtures



Ethacryl™ HF is a high-performance aqueous dispersant designed for use in concrete applications.

Ethacryl™ HF is a key component for formulating concrete admixtures.

It provides fluidity to concrete formulations at substantially reduced water content. Benefits include increased productivity, lower costs and improved concrete properties. It has been specifically designed for **Self Compacting Concrete** and for **High Performance Concrete**.

• TYPICAL ANALYSIS

Nature: Aqueous solution of Polycarboxylate Ether

Appearance (20°C): Yellow to brownish liquid

Solids content (%): 40

pH (20°C): 4

Specific gravity (20°C): 1.07

Viscosity (mPa.s): 350

Chloride content (%): < 0.01

Alkali content (Na₂O_{eq}): < 1.5

• ADVANTAGES

Ethacryl™ HF features:

- 🔥 New generation of polycarboxylate ether
- 🔥 High water reduction ability
- 🔥 Effectiveness at low dosage
- 🔥 Easy to formulate

Ethacryl™ HF benefits:

- 🔥 Increases productivity
- 🔥 Reduces costs
- 🔥 Confers good pumpability to concrete

Ethacryl™ HF is a key component for designing concrete admixtures. As a new generation of polycarboxylate ether, **Ethacryl™ HF** enables the formulator to achieve high performance superplasticizing admixtures.

Ethacryl™ HF is fully compatible with the major chemicals and additives used in concrete admixtures.

• APPLICATIONS

Ethacryl™ HF due to its exceptional capacity to control flow of cement is used as a high **water reducing agent**. In standard conditions, in combination with a defoamer, water reduction of 30% is achieved.

Ethacryl™ HF has been specifically designed for **Self Compacting Concrete (SCC)** and for **High Performance Concrete (HPC)**.

Remark:

When incorporating **Ethacryl™ HF** into your concrete formulation, it is noteworthy that the dispersing power of **Ethacryl™ HF** is not immediate. During the first minutes of mixing a dough is obtained. Then, **Ethacryl™ HF** turns the blend into a very fluid media.

Recommendations:

Ethacryl™ HF does not contain defoamers. When a specific level of air entrapment is targeted, formulating **Ethacryl™ HF** together with **Rhealis™ Dfoam** is recommended.

Anti-synergistic effects have been reported when mixing polycarboxylate ethers and polynaphthalene sulfonates.

• STORAGE

Ethacryl™ HF can present colour variations from light yellow to slightly brown. These variations can occur in normal storage conditions. They have no influence on the product performances.

Ethacryl™ HF should be protected from the effects of weathering and stored between 5 and 40°C.

In these conditions, products should be used within 12 months after delivery.

• STANDARD PACKAGING

- Bulk deliveries
- 1 000 l containers

• HEALTH & ENVIRONMENTAL DATA

Please refer to the Material Safety Data Sheet.

Website: www.coatex.com
The information contained in this technical documentation relates only to the specific material designated herein and does not relate to use in combination with any other material or in any process. The information provided herein is based on technical data that Coatex believes to be reliable, provided that Coatex makes no representation or warranty as to the completeness or accuracy thereof and Coatex assumes no liability resulting from its use for any claims, losses, or damages of any third party. Recipients receiving this information must exercise their own judgment as to the appropriateness of its use and it is the user's responsibility to assess the material's suitability (including safety) for a particular purpose prior to such use. Reference to trade names used by other companies is neither a recommendation, nor does it imply that similar products could not be used (2015/11/19)

Ethacryl™ HF - Page 2/2

COATEX
ARKEMA GROUP

Technický list – Sika ViscoCrete – 4035


Construction

Technický list
Datum vydání: 06/2018
Identifikační č.: 02 13 01 01 100 0 001209
Verze č. 01
Sika® ViscoCrete®-4035

Sika® ViscoCrete®-4035

Univerzální a vysoce účinný superplastifikátor pro transportbeton

Popis výrobku	Sika® ViscoCrete®-4035 je univerzální, velmi účinný superplastifikátor pro transportbeton – nižších i vyšších pevnostních tříd.
Použití	<p>Sika® ViscoCrete®-4035 je vhodný především pro:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ transportbeton stupně konzistence S3 až S5 nebo F4 až F6 ■ samozhutnitelné betony (SCC) ■ transportbeton s nízkou ztrátou konzistence ■ transportbeton s dlouhou dobou dopravy nebo zpracování ■ transportbeton s nízkým vodním součinitelem ■ vysoko pevnostní a hutné betony
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> ■ lepší prostorové rozptýlení jemných podílů ■ zlepšuje dispergaci a smáčení zrn cementu ■ snižuje třecí síly mezi zrnny cementu a kameniva ■ snižuje spotřebu záměsové vody ■ prodlužuje dobu zpracovatelnosti <p>U transportbetonu Sika® ViscoCrete®-4035 umožňuje:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ snížení vodního součinitele a tím zvýšení hutnosti a pevnosti ■ měkhou konzistenci a tím značné snížení nákladů na zpracování a zhutňování ■ při vyšších teplotách betonu zaručí pomalou ztrátu konzistence a tím pomůže dosáhnout delší doby zpracovatelnosti
Zkušební zprávy	
Testy	<p>Vydáno Prohlášení o vlastnostech č. 02 13 01 01 100 0 001209 1020, certifikováno Oznámeným subjektem č. 1020, certifikát 1020-CPR-020027779.</p> <p>Splňuje požadavky EN 934-1 a EN 934-2: přísady do betonu, tab. 3.1/3.2</p>
Technická data	
Barva a vzhled	Nažloutlá kapalina.
Balení	<p>Kontejner: 1000 kg Sud: 200 kg</p> <p>Další balení na vyžádání.</p>
Skladování	
Podmínky skladování / Trvanlivost	<p>12 měsíců od data výroby pouze v originálních, neotevřených, nepoškozených obalech. Chraňte před přímým slunečním zářením a mrazem.</p> <p>Kontejnery musí být před dalším plněním důkladně vypláchnuty.</p> <p>Skladujte za teplot +5 °C až +30 °C. Otevřená balení spotřebujte co nejdříve.</p>



Technické údaje	
Chemická báze	Vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů.
Objemová hmotnost	~ 1,08 kg/l (při +20 °C)
Hodnota pH	~ 4,5 ± 0,5
Obsah chloridových iontů	≤ 0,10 %
Obsah alkálií (Na₂O)	≤ 1,0 %
Informace o systému	
Aplikační podrobnosti	
Kompatibilita	Sika® ViscoCrete®-4035 je možné kombinovat s dalšími přísadami firmy Sika (např. Sika® FS 1, SikaRapid C-100, Sika® Rapid 1, Sika® VZ atd.). Pro bližší informace kontaktujte vždy technické oddělení firmy Sika.
Dávkování	Doporučené dávkování: Pro střední hodnoty konzistence: 0,3 – 0,7 % z hmotnosti cementu. Pro beton s vyšší hodnotou konzistence, velmi nízkým vodním součinitelem a pro samozhutitelné betony: 0,6 – 1,4 % hmotnosti cementu.
Důležitá upozornění	Sika® ViscoCrete®-4035 doporučujeme přidávat současně se záměsovou vodou a zamíchat do betonu před přidáním případných dalších přísad. Pro optimální využití značného snížení množství vody doporučujeme minimální dobu míchání 60 vteřin. Jemné dávkování vody doporučujeme spustit po uplynutí 2/3 doby míchání, aby se zamezilo jejímu přebytku v betonu. Při eventuálním dalším dávkování na staveništi doporučujeme použít stejný superplastifikátor jako na betonárně. Při dodatečném dávkování do mixu musí být zajištěno stejnoměrné rozmíchání superplastifikátoru v betonu, proto doporučujeme dobu míchání 1 minutu na každý m ³ betonu, nejméně však 6 minut. Před prvním použitím je třeba provést průkazní zkoušky podle platných norem.
Platnost hodnot	Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu. Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu. Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese www.sika.cz .
Bezpečnostní předpisy	<ul style="list-style-type: none"> • Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci. • Při aplikaci používejte ochranný oděv, brýle a rukavice. • Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu. • Odstraňování odpadu - Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech. • Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předat odborné firmě k likvidaci. Fólie je možné recyklovat.
Místní omezení	V závislosti na specifických místních omezeních se mohou výsledné vlastnosti tohoto výrobku v různých zemích lišit. Vždy se řiďte informacemi uvedenými v platném Technickém listu.

Technický list – Uhlíkové nanotrubičky TNM7

**Yurui(Shanghai) Chemical Co.,Ltd**

Tel: 021-50456736 Fax: 021-60853441

Add: No.2277,ZuChong Zhi Road,Pudong,Shanghai,China

Website:www.riyngroup.com Email:Pauling@riyngroup.com

TNM7	Purified MWCNTs
MWCNTs	Purity:>95wt%
95%, 30-50nm	ID: 5-12nm
	OD: 30-50nm
	Length: 10-20μm
	SSA: >60m ² /g
	ASH: <1.5wt%
	Bulk density: 0.22 g/cm ³
	True density: ~2.1g/cm ³
	EC:>100s/cm
	Making method:CVD

Technický list – Sikadur – 31 CF Rapid


Construction

Technický list
Vydání 05/2013
Identifikační č.:
02 04 02 03 001 0 000043
Sikadur®-31 CF Rapid

Sikadur®-31 CF Rapid

2komponentní tixotropní epoxidové lepidlo

Popis výrobku	Sikadur®-31 CF Rapid je tixotropní 2komponentní konstrukční lepidlo a opravná malta na bázi epoxidové pryskyřice a speciálních plniv, bez rozpouštědel. Použitelné v teplotním rozmezí +5 °C až +20 °C.
Použití	<p>Konstrukční lepidlo a malta:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ beton, přírodní kámen ■ keramika, vláknocement ■ malta, cihly a omítky ■ ocel, železo, hliník ■ dřevo a dřevotřískové desky ■ azbestocement ■ polyester, epoxid ■ sklo <p>Opravná malta a tmel:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ zatěsňování prostupků po spínacích tyčích u konstrukcí ze Sika vodonepropustného betonu a konstrukcí bílých van ■ okraje a rohy ■ díry, hnízda v betonu ■ na vertikální plochy a pro práci nad hlavou <p>Výplně spár a zatmelení trhlin</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ opravy boků spár a trhlin na šikmých plochách a v rozích
Vlastnosti / výhody	<ul style="list-style-type: none"> ■ jednoduché míchání a aplikace ■ vhodný pro suchý i vlhký betonový podklad ■ výborná přídržnost k většině stavebních materiálů ■ tixotropní – nestéká při aplikacích na vertikálních plochách nebo nad hlavou ■ bez rozpouštědel ■ vytvrzuje bez smršťování ■ komponenty mají odlišnou barvu pro snazší orientaci během míchání ■ použití bez primeru ■ vysoká počáteční a konečná mechanická odolnost ■ vysoce odolný proti abrazi ■ nepropustný pro páry a tekutiny ■ vysoce chemicky odolný
Testy	
Zkušební zpráva	Vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 1504-4.



Údaje o výrobku

Barva	Komponent A: bílá
	Komponent B: tmavě šedá
	Směs A+B: betonově šedá

Balení	6 kg (A+B): předem nadávkované množství, paleta 480 kg (80 x 6 kg) 1,2 kg (A+B): předem nadávkované množství, krabice (6 x 1,2 kg)
---------------	---

Skladování

Podmínky skladování / Trvanlivost	24 měsíců od data výroby v neotevřeném, neporušeném, originálním balení v suchu a při teplotách +5 °C až +30 °C. Chraňte před přímým slunečním zářením.
--	---

Technické údaje

Chemická báze	Epoxidová pryskyřice.
Objemová hmotnost	1,94 ± 0,1 kg/l (směs A+B) (při +23 °C)
Stěkavost	do tloušťky 15 mm nestéká na svislých plochách (dle EN 1799)
Tloušťka vrstvy	30 mm max. Při větší tloušťce vrstvy pracujte v několika krocích. Nemíchejte další balení, dokud není zpracováno již namíchané balení, zabraňte zkrácení doby zpracovatelnosti.
Objemové změny	Vytvrzuje bez smrštění.
Koeficient teplotní roztažnosti	6,1 x 10 ⁻⁵ na °C (+23 °C až +80 °C) (dle EN 1770)
Tepelná stabilita	Heat Deflection Temperature (HDT) – teplotní deformace (dle ISO 75) HDT = +49 °C (7 dní / +23 °C), tloušťka vrstvy 10 mm

Mechanické / Fyzikální vlastnosti**Pevnost v tlaku**

(dle EN 196)

Doba zrání	Teplota při zrání	
	+5 °C	+20 °C
1 den	33 - 43 N/mm ²	52 - 62 N/mm ²
3 dny	53 - 63 N/mm ²	58 - 68 N/mm ²
7 dní	58 - 68 N/mm ²	69 - 79 N/mm ²

Pevnost v ohybu

(dle EN 196)

Doba zrání	+5 °C	+20 °C
1 den	9 - 19 N/mm ²	21 - 31 N/mm ²
3 dny	16 - 26 N/mm ²	23 - 33 N/mm ²
7 dní	21 - 31 N/mm ²	25 - 35 N/mm ²

Pevnost v tahu

(dle ISO 527)

Doba zrání	+5 °C	+20 °C
1 den	1 - 11 N/mm ²	11 - 21 N/mm ²
3 dny	13 - 23 N/mm ²	12 - 22 N/mm ²
7 dní	13 - 23 N/mm ²	14 - 24 N/mm ²

18.Zdroje

- [1] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. Úvod do studia materiálů [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005 [cit. 2018-01-04]. ISBN 80-708-0568-4.
- [2] BERKA, K. Uhlíkový nanosvět: Univerzita Palackého [online], [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: http://www.popup.upol.cz/files/forSchoolsDocuments/2013080812013857_PrF-Berka.pdf
- [3] HASE, V. Začlenění rizik do hodnocení konce životního cyklu produktů s nanomateriály: výzkumný projekt [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <https://www.fbi.vsb.cz/cs/veda-a-vyzkum/projekty/?projectDetailId=23951>
- [4] Allotropes of carbon. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Allotropes_of_carbon
- [5] Uhlík. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADk>
- [6] ZÍTKA, O., ed. Moderní nanotechnologie na počátku 21. století: kolekce učebních textů projektu OPVK NANOTEAM [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013 [cit. 2018-01-04]. ISBN 978-80-214-4802-5.
- [7] Periodická tabulka: Uhlík [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/6.html>
- [8] DEANEN, M, et. al. The wondrous world of carbon nanotubes a review of current carbon nanotube technologies. Eindhoven university of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 2003.
- [9] Uhlíkové nanotrubičky [online]. 2011 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.grafen.cz/nanotechnologie/23-uhlikove-nanotrubičky>
- [10] SÁEZ DE IBARRA, Y., GAITERO, J. J., ERKIZIA, E., CAMPILLO, I., Atomic force microscopy and nanoindentation of cement pastes with nanotube dispersions, Physica status solidi 2006, roč.203, s. 1076-1081
- [11] LIU, CH., CHENG, H. M. Carbon nanotubes: controlled growth, Materials Today 2013, roč. 16, s. 1-10

- [12] Nanotubes and Buckyballs. Nanotechnology Now [online]. 2016 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm>
- [13] REILLY, M. Raymond. Carbon Nanotubes: Potential Benefits and Risks of Nanotechnology in Nuclear Medicine. The journal of nuclear medicine [online]. University of Toronto, 2007, 48(7), 1039-1042 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://jnm.snmjournals.org/content/48/7/1039.full.pdf+html>
- [14] KUTOVÁ, Lenka. Vliv parametrů dispergačního média na kvalitu rozmíchání nanočástic. Brno, 2016. 79 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [15] Nanotubos de carbono. El Tamiz [online]. 2008 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <https://eltamiz.com/2008/02/20/nanotubos-de-carbono/>
- [16] Virtually indestructible, yet it breathes like Egyptian cotton [online]. 2013 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <https://engineeringandbeyond.wordpress.com/tag/supersuit/>
- [17] Hybridizace (chemie). Wikiskripta [online]. 2016 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: [http://www.wikiskripta.eu/w/Hybridizace_\(chemie\)](http://www.wikiskripta.eu/w/Hybridizace_(chemie))
- [18] HARRIS, Peter J. F. Carbon. Nanotube Science - Synthesis, properties and applications. 1. vydání. Londýn : Cambridge University Press, 2009. p. 179. ISBN 978-0-521-51691-7.
- [19] KAUSHIK, B.K., MAJUMDER, M.K., Carbon Nanotube Based VLSI Interconnects, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, DOI 10.1007/978-81-322-2047-3_2
- [20] Electrical properties of nanotubes. UnderstandingNano.com [online]. 2014 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.understandingnano.com/electrical-properties-carbon-nanotubes.html>
- [21] Bc. IŽÁK Tibor, Štúdium rastu uhlíkových nanorúrok merádou chemickej depozície z par. Bratislava, 2005. 60 s., Diplomová práce. Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Fakulta elektroniky a

informatiky, Katedra mikroelektroniky. Vedoucí práce doc. Ing. R.

Redhammer, Ph.D, Ing. Tibor Daniš.

[22] EBBESEN, T.W., Carbon nanotubes, Phys. Today 49 6 (1996) 497-499

[23] KONSTA-GDOUTOS, Maria S.; METAXA, Zoi S.; SHAH, Surendra P. Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites. Cement and Concrete Composites, 2010, 32.2: 110-115.

[24] Buckypaper. In: Wikipedia [online]. [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Buckypaper>

[25] Zkouška tvrdosti dle Vickerse. ConVERTER [online]. 2002 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.html>

[26] KORAYEM, A. H., et al. A review of dispersion of nanoparticles in cementitious matrices: Nanoparticle geometry perspective. Construction and Building Materials, 2017, 153: 346-357.

[27] Balený portlandský cement CEM I 42,5 R. Českomoravský cement [online]. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>

[28] Kamenolom Olbramovice. Českomoravský štěrk [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.cz/cs/kontakty/cms/provozovny/olbramovice>

[29] Phoenix Instrument RSM-10HS - Digital magnetic stirrer with heating - stainless steel surface - 3 L. Novolab [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <https://www.novolab-labware.com/rsm-10-hs-magnetische-roerder-inox-opp.html>

[30] SONOPULS HD 3100/3200 - ultrazvukové homogenizátory ,nové modely. Ilabo [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.ilabo.cz/firmy/bandelin/ultrazvukove-homogenizatory/sonopuls-hd-3100-3200-ultrazvukove-homogenizatory-nove-modely/>

[31] ČSN EN 12350-2. ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

- [32] Sednutí kužele. Ebeton [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/sednuti-kuzele>
- [33] ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [34] Pevnost betonu v tlaku - zkouška. Ebeton [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska>
- [35] ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [36] Pevnost betonu v tahu za ohybu - zkouška. Ebeton [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tahu-za-ohybu-zkouska>
- [37] ČSN EN 12390-6: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [38] Pevnost betonu v příčném tahu - zkouška. Ebeton [online]. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-pricnem-tahu-zkouska>
- [39] HOBST, L., ADÁMEK J., CIKRLE P. a SCHMID P., Diagnostika stavebních konstrukcí: Přednášky. Brno: FAST VUT v Brně, 2005.
- [40] ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu. 1969. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1969.
- [41] MANZUR, T., Nur YAZDANI a Md. Abul Bashar EMON. Potential of Carbon Nanotube Reinforced Cement Composites as Concrete Repair Material: Tanvir Manzur,¹ Nur Yazdani,² and Md. Abul Bashar Emon¹. Journal of Nanomaterials [online]. 2016, 1-10 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2016/1421959/>

19. Seznam obrázků

Obrázek 1: Vybrané alotropy uhlíku: A) grafit; B) amorfni uhlík; C) diamant; D) lonsdaleit [6]	13
Obrázek 2: Porovnání některých vybraných vlastností diamantu a grafitu [1]	14
Obrázek 3: Srolování grafenu do SWCNT [6]	15
Obrázek 4: Jednotěnné uhlíkové nanotrubičky vlevo a vícetěnné uhlíkové nanotrubičky vpravo [14]	15
Obrázek 5: Jedno a dvouvrstvé nanotrubičky [13]	16
Obrázek 6: Speciální typy nanotrubic [15]	16
Obrázek 7: Vlevo tři sp^2 orbitaly, vpravo čtyři sp^3 orbitaly [17]	17
Obrázek 8: Elektrické vlastnosti závislé na orientaci šestiúhelníků [20]	18
Obrázek 9: Schématické znázornění emise elektronů v silném elektrickém poli [21]	20
Obrázek 10: Buckypaper vyrobený z uhlíkových nanotrubíček [24]	23
Obrázek 11: Zkouška tvrdosti podle Vickerse [25]	24
Obrázek 12: Schopnost deaglomerace CNT do matrice [14]	27
Obrázek 13: Schéma funkcionalizace uhlíkových nanotrubíček [14]	28
Obrázek 14: Schématické znázornění povrchového stavu CNT zvýšením koncentrace surfaktantu I) nízký koncentrace surfaktantu, II) tvorba tyčinkovitých micel, III) tvorba vícevrstevných molekul povrchově aktivních látek [26]	30
Obrázek 15: Balený portlandský cement CEM I 42,5 R [27]	32
Obrázek 16: Ukázka použitých kameniv pro výrobu betonu [28]	33
Obrázek 17: Připravené uhlíkové nanotrubičky TNM7 s naváženou povrchově aktivní látkou Ethacryl v injekční stříkačce	35
Obrázek 18: Dvojsložkové lepidlo Sikadur 31 CF Rapid	36
Obrázek 19: Magnetické míchadlo Phoenix Instrument RSM-10HS	38
Obrázek 20: Ultrazvukový kavitátor [30]	39
Obrázek 21: Rozměry Abramsova kužele [32]	41
Obrázek 22: Zkouška sednutí [32]	42
Obrázek 23: Zkouška pevnosti v tlaku [34]	43
Obrázek 24: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu [36]	44
Obrázek 25: Pevnost v příčném tahu [38]	45
Obrázek 26: Odtrhová zkouška na betonu [39]	46
Obrázek 27: Průběh v závislosti na čase dle ČSN 73 1322 [40]	47
Obrázek 28: Dispergace CNT	52
Obrázek 29: Suspenze CNT a navážené množství superplastifikační přísady pro recepturu CNT0,006	53
Obrázek 30: Zkušební vzorky v ocelových formách	54
Obrázek 31: Zkouška pevnosti v tlaku na zlomcích trámů	56
Obrázek 32: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu	58
Obrázek 33: Zkoušení pevnosti v příčném tahu	59

<i>Obrázek 34: Připravené vzorky na zkoušku pevností v tahu povrchových vrstev betonu</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 35: Zkouška pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu za použití přístroje DYNY</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 36: Dokončené odtrhy vlevo; vpravo ukázka odtrhaných terčů, kdy je vidět, že k porušení došlo vždy v povrchu betonu</i>	<i>62</i>

20. Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Všeobecné shrnutí vlastností CNT [22].....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 2: Vybrané vlastnosti uváděné výrobcem portlandského cementu CEMI 42,5 R, Českomoravský cement, a.s., výrobní závod Mokrý.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 3: Použitá kameniva pro výrobu betonu</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 4: Vybrané vlastnosti superplastifikační přísady Coatex Ethacryl.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 5: Vybrané vlastnosti superplastifikační přísady Sika ViscoCrete 4035.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 6: Vybrané vlastnosti uhlíkových nanotrubiček TNM7.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 7: Vybrané vlastnosti lepidla Sikadur – 31 CF Rapid</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 8: Třídy sednutí betonu</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 9: Poměr složek v betonu.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 10: Receptura</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 11: Pevnosti v tlaku betonové směsi ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny oproti pevnosti v tlaku referenčních vzorků – zkouška provedena na zlomcích trámů.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 12: Pevnosti v tahu za ohybu betonové směsi ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny oproti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 13: Pevnosti v příčném tahu betonové směsi ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny oproti pevnosti v příčném tahu referenčních vzorků.</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 14: Pevnosti v tahu povrchových vrstev betonové směsi ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny oproti pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu referenčních vzorků.</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 15: Pevnost v tahu za ohybu pro zkoušku mrazuvzdornosti betonu ve stáří 28 dní a porovnání se vzorky nezmrazovanými. Pro zmrazovaná tělesa je označení M, pro nezmrazovaná tělesa platí označení N.</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 16: Porovnání pevností při zkoušce mrazuvzdornosti a jejich nárůst nebo pokles oproti vzorkům referenčním.</i>	<i>64</i>

21. Seznam grafů

<i>Graf 1: Poměr složek ve směsi v %.....</i>	<i>48</i>
<i>Graf 2: Procentuální změna pevností v tlaku betonové směsi vyztužené uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tlaku referenčních vzorků v 7 a 28 dnech.....</i>	<i>56</i>
<i>Graf 3: Procentuální změna pevností v tahu za ohybu betonové směsi vyztužené uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků v 7 a 28 dnech.</i>	<i>57</i>
<i>Graf 4: Procentuální změna pevností v tahu za ohybu betonové směsi vyztužené uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků v 7 a 28 dnech.</i>	<i>59</i>
<i>Graf 5: Procentuální změna pevností v tahu povrchových vrstev betonu vyztužený uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu referenčních vzorků v 7 a 28 dnech.....</i>	<i>61</i>
<i>Graf 6: Pevnosti v tahu za ohybu při zkoušce mrazuvzdornosti – M (zmrazovaná tělesa), N (porovnávací nezmrazovaná tělesa).....</i>	<i>63</i>

22. Použité zkratky

SiO ₂	oxid křemičitý
TiO ₂	oxid titaničitý
UV	ultrafialové
CNT	carbon nanotube (uhlíkové nanotrubičky)
SWCNT nanotrubičky)	single wall carbon nanotube (jednostěnné uhlíkové nanotrubičky)
MWCNT nanotrubičky)	multi wall carbon nanotube (vícestěnné uhlíkové nanotrubičky)
DWCNT nanotrubičky)	dual walled carbon nanotube (dvouvrstvé uhlíkové nanotrubičky)
AFM	ultrazvuk atomové síly (mikroskopie atomárních sil)
C	uhlík
EPFL	švýcarský federální technologický institut v Lausanne
SEM	skenovací elektronový mikroskop
F	zatížení
Ca(OH) ₂	hydroxid vápenatý
COOH	karboxylová kyselina
C-S-H	kalcium hydrosilikát
CVD	chemická depozice (Chemical Vapour Deposition)
SP	plastifikační přísada Sika Viscocrete 4035